INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Julio 2019 • N.º 514 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INFORME ESPECIAL • 50 AÑOS DE LA LLEGADA A LA LUNA

APOLO 11

PASADO, PRESENTE Y FUTURO DE UN HITO HUMANO



MEDIOAMBIENTE
«Ciudad esponja»: un nuevo modelo de urbanismo sostenible

SALUD
Luces y sombras de la vacuna contra el dengue

ECOLOGÍA
Efectos del cambio climático en la vegetación de los Andes





DAVID LIITTSCHWAGER

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Julio 2019, Número 514

ARTÍCULOS



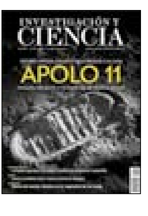
12



INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



El 20 de julio de 1969 Neil Armstrong y Buzz Aldrin se convertían en los primeros seres humanos que dejaban su huella en un mundo extraterrestre. Medio siglo después, recordamos cómo transcurrieron los momentos más críticos de aquella misión, por qué el legado científico del programa Apolo cambiaría para siempre las ciencias planetarias y cómo se ve hoy la futura exploración del satélite. Fotografía de Getty Images/stevecoleimages/iStock.

redaccion@investigacionyciencia.es



Marzo 2019

ADAPTADOS AL EJERCICIO

En «Actividad física: una necesidad fisiológica» [Investigación y Ciencia, marzo de 2019], Herman Pontzer expone las investigaciones que han concluido que, tras más de dos millones de años de evolución, la fisiología humana se adaptó a un elevado nivel de actividad física.

Me gustaría saber si existe una relación entre dicha capacidad para el esfuerzo corporal y nuestra falta de vello con relación a otros grandes simios. Los seres humanos podemos sudar copiosamente para mantener la temperatura, lo que resulta obligado durante períodos prolongados de ejercicio físico. Cabe pensar que sudar no resultaría tan eficiente si el sudor tuviera que empapar una gruesa capa de pelo. Tal vez, al tiempo que evolucionamos para adaptarnos a un esfuerzo físico cada vez mayor, también perdimos más y más vello corporal.

Barry Siler
Loveland, Colorado

En su artículo, Pontzer afirma que «andar menos de 10.000 pasos diarios se asocia a un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares y metabólicas». Dicho valor de referencia de 10.000 pasos al día ha ganado popularidad en los medios de comunicación por cuanto simplifica las cosas, y puede rastrearse décadas atrás hasta el eslogan de podómetro japonés. Sin embargo, tres estudios recientes, en ninguno de los cuales he participado, han revisado las pruebas existentes al respecto y han hallado grandes diferencias en la cantidad de actividad física diaria que necesitan niños, adolescentes, adultos y ancianos, así como personas con enfermedades crónicas.

Entiendo la necesidad de ser conciso en un artículo de divulgación. Pero dar una misma cantidad de referencia para todos los grupos de población, la cual además no se basa en ninguna investigación científica, puede resultar perjudicial a efectos de salud pública.

Arno Maetens
Investigador doctoral en condicionantes sociales de la salud
Universidad Libre de Bruselas

Responde Pontzer: *En cuanto al comentario de Siler, la piel no fosiliza, pero la mayoría de los paleontólogos estarían de acuerdo en que la falta de vello y la sudoración probablemente evolucionaron a la par que el aumento de la actividad física en los primeros estadios del género* Homo. *Los humanos somos los animales que más sudamos de todo el planeta, y nuestra facultad para mantener la temperatura nos permite continuar en circunstancias que harían derretirse a otros mamíferos.*

La referencia de 10.000 pasos al día, ampliamente usada en salud pública, es un número redondo y fácil de recordar. Sin embargo, Maetens tiene razón cuando afirma que no representa necesariamente el valor más adecuado para todos los grupos de población. Por ejemplo, los niños deberían hacer más (una buena meta oscilaría entre los 11.000 y los 15.000 pasos), mientras que las personas mayores y aquellas con movilidad reducida pueden conformarse con menos. La buena noticia para cualquier persona preocupada por el número de pasos diarios es que más es casi siempre mejor. Con excepción de aquellas circunstancias en las que la salud pueda verse perjudicada por el ejercicio físico, no hay pruebas de que caminar demasiado sea malo para nadie, con independencia de lo que digan mis hijos cuando salimos de excursión.

AUTOMÓVILES Y EMISIONES DE CARBONO

En «El último recurso» [Investigación y Ciencia, marzo de 2019], Richard Conniff afirma que un coche emite de media unas 4,6 toneladas anuales de dióxido de carbono. Agradecería una explicación acerca de cómo se llega a esta cifra. Suponiendo que un vehículo típico pesa unos 2000 kilos, se me hace difícil pensar que, a lo largo de un año, emitirá una cantidad de dióxido de carbono equivalente a más de dos veces su peso.

Consideremos un coche que recorre 20.000 kilómetros al año con un consumo medio de 10 litros por cada 100 kilómetros. Eso supondría unos 2000 litros de gasolina, la cual tiene una densidad de unos 0,7 kilogramos por litro. Si la afirmación del artículo es correcta, lo anterior significaría que quemar 1400 kilos de gasolina produciría más de tres veces su peso en dióxido de carbono.

John Cardwell
Supply, Carolina del Norte

Responde Conniff: *La pregunta saca a relucir una de las cuestiones que más confusión provocan sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque un litro de gasolina pesa unos 0,7 kilos, cuando lo quemamos emitimos a la atmósfera unos 2,3 kilogramos de dióxido de carbono (sin contar las emisiones liberadas durante su fabricación y transporte al mercado). ¿Cómo es posible?*

La gasolina consta en casi un 90 por ciento de carbono. A través de la combustión, prácticamente cada uno de esos átomos de carbono se combina con otros dos de oxígeno. El átomo de oxígeno es 1,33 veces más pesado que el de carbono; como consecuencia, por cada kilogramo de gasolina quemado, 0,9 kilogramos de carbono se combinan con 2,4 kilogramos de oxígeno, lo que da como resultado 3,3 kilogramos de CO_2.

La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. llegó a la cifra de emisiones anuales que se da en el artículo suponiendo que el vehículo promedio recorre unos 18.500 kilómetros al año y presenta un consumo de unos 10,75 litros por cada 100 kilómetros. Ello suma unos 2000 litros de gasolina, lo que emite unos desalentadores 4600 kilogramos, o 4,6 toneladas, de dióxido de carbono.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



NUEVOS DATOS indican que los sedimentos del Mar Muerto albergaron en el pasado vida bacteriana.



GETTY IMAGES

MICROBIOLOGÍA

Vida en el Mar Muerto

Vestigios de vida bacteriana en los sedimentos de este lago aportarían pistas sobre la posible vida extinta en Marte

El Mar Muerto no está del todo muerto. Sin duda es uno de los ecosistemas más hostiles del planeta, con una salinidad tan elevada que los turistas flotan sin esfuerzo en la salmuera que son sus aguas. Desprovisto de todo rastro de vegetación, peces o cualquier otra forma visible de vida, resulta excusable que los bañistas crean que nada pulula en sus profundidades. Pero hace tiempo que se sabe que en las aguas del lago habitan unos microorganismos unicelulares llamados arqueas que han llevado a muchos a preguntarse si otros seres sencillos podrían sobrevivir también en sus sedimentos pese a la ausencia de oxígeno, luz y nutrientes.

Camille Thomas, geomicrobiólogo de la Universidad de Ginebra, y sus colaboradores han desenterrado fósiles moleculares en sedimentos del Mar Muerto que indican que en él habrían vivido bacterias en tiempos relativamente recientes, hace unos 12.000 años. Es la primera vez que se descubre una forma de vida distinta de las arqueas en este ecosistema, lo cual indica que ese tipo de vida podría existir (o haber existido) en otras zonas similares de la Tierra y en algún lugar del sistema solar, como Marte. Los resultados se publicaron en *Geology* el pasado marzo.

Thomas y su equipo formaron parte de una iniciativa internacional que en 2010 perforó hasta 430 metros por debajo del lecho del lago, una oportunidad sin precedentes para conocer mejor el clima pasado. Después de años dedicados a analizar las muestras, el equi-

po descubrió arqueas enterradas en el sedimento. Esto demuestra que pueden sobrevivir en el lago y en el sedimento del fondo, donde las condiciones son más adversas, si cabe. Pero Thomas consideraba improbable que allí pudiera vivir nada más, aparte de las arqueas: «Pensaba que era un ambiente extremo, solo apto para "tipos duros"».

Sin embargo, el último hallazgo del equipo refuta esa idea. Thomas y sus colaboradores analizaron capas de yeso (un mineral que se forma al evaporarse el agua salada) depositadas hace unos 120.000 años, de lo que se deduce que el lago arcaico era tan hostil como el actual. Sepultados en esas capas descubrieron ésteres de cera, unas moléculas ricas en energía que los microorganismos sintetizan y almacenan cuando el alimento escasea. Como las arqueas no producen esas moléculas y es muy improbable que los organismos pluricelulares sobrevivan en semejantes condiciones, el equipo llegó a la conclusión de que sus artífices debieron de ser bacterias coetáneas.

¿Pero cómo sobrevivían? Los ésteres de cera portaban vestigios de membranas celulares de arqueas, por lo que los investigadores piensan que dichas bacterias se alimentaban de restos de aquellas. Ese mecanismo de supervivencia explicaría cómo lograban crecer en unas condiciones aparentemente tan hostiles. «Si bien sabemos que la biomasa microbiana alberga una diversidad inmensa, siempre es interesante ver qué estrategias adoptan esas comunidades para sobrevivir en entornos diferentes», afirma Yuki Weber, bioquímico de la Universidad Harvard, ajeno al estudio. «Nos queda mucho por saber sobre el metabolismo microbiano.»

Además, Thomas y sus colaboradores hallaron indicios interesantes de que el ecosistema del Mar Muerto podría acoger vida bacteriana incluso hoy. Justo después de abrir un vial grande lleno de sedimentos actuales percibieron un olor a huevos podridos, un signo revelador de la presencia de sulfuro de hidrógeno, producido a menudo por bacterias. No obstante, este gas también puede tener un origen abiótico, como la actividad geotérmica (por la que lugares como el Parque Nacional de Yellowstone son famosos), de modo que los investigadores no están seguros de que bajo el lago salado habiten todavía bacterias.

Aunque no sea así, es muy probable que en condiciones similares de la vasta biosfera subterránea del planeta vivan bacterias, razona Weber. A medida que los expertos sigan escrutando los ambientes extremos en los que la vida se abre paso, mejorarán nuestros conocimientos de cómo y dónde surge en la Tierra y en otros planetas, afirma.

Tomemos como ejemplo Marte. En 2011, el robot explorador *Opportunity* de la NASA encontró yeso, el mismo mineral hallado por Thomas en los sedimentos del Mar Muerto. Su presencia indica que, conforme el planeta rojo se calentó, sus mares y lagos se evaporaron. Antes de desaparecer, tales masas de agua probablemente se parecieron mucho al Mar Muerto, quizá incluso en lo que concierne a los procesos biológicos, afirma Tomaso Bontognali, del Instituto de Exploración Espacial de Suiza, ajeno al estudio del Mar Muerto. Bontognali trabaja en el vehículo de exploración *ExoMars*, de la Agencia Espacial Europea, que está previsto que en 2021 se pose en un antiguo lecho marino de Marte. Allí analizará testigos de sedimento con una versión simplificada del método usado por el equipo de Thomas. Las pruebas del Mar Muerto «hacen más factible la hipótesis de que Marte albergara vida en el pasado», asegura Bontognali.

—*Shannon Hall*

FISIOLOGÍA ANIMAL

Gonópodos resplandecientes

Los genitales de los milpiés emiten fluorescencia al ser iluminados con luz ultravioleta

Los milpiés son difíciles de clasificar. Las especies de este grupo suelen compartir los mismos colores apagados y se confunden en la penumbra del suelo del bosque. Pero cuando se les ilumina con luz ultravioleta, algunas muestran una característica destacable: sus genitales brillan con intensidad.

Stephanie Ware, investigadora del Museo Field de Historia Natural de Chicago, y sus colaboradores han recurrido a esa peculiar fluorescencia para identificar estos artrópodos. Ware montó un módico flash de luz UV en una cámara para captar imágenes de los «gonópodos» brillantes, apéndices especializados que los milpiés despliegan en la cópula. Tomó varias fotografías que luego agrupó para crear una imagen compuesta. En las fotografías con luz visible «es realmente difícil distinguir las distintas partes, pero con la luz UV, brotan como de la nada patrones y colores».

Esta técnica ayuda a distinguir las especies de aspecto similar, según Petra Sierwald, zoóloga del Museo Field. Ella y Ware son, junto con sus colaboradores, autoras de un estudio sobre el tema, que se publicó en línea en abril en *Zoological Journal of the Linnean Society*. Por medio de esta técnica, han identificado ocho especies (hasta ahora clasificadas erróneamente como doce) en el género norteamericano *Pseudopolydesmus*. Sierwald afirma que este tipo de imágenes podría tener aplicaciones en edafología y bioconservación, pues ayudarían a saber con rapidez si ciertas especies de milpiés están presentes en un hábitat. «Los miriápodos son excelentes indicadores de la salud del suelo porque reciclan la hojarasca en descomposición», explica.




LOS GENITALES del milpiés *Pseudopolydesmus caddo* brillan bajo los rayos UV.

STEPHANIE WARE, MUSEO FIELD

Lo cierto es que los científicos ignoran por qué brillan los genitales. «El orden *Polydesmida* es ciego, carece de ojos», aclara Sierwald. M. Gabriela Lagorio, química especialista en fotobiología de la Universidad de Buenos Aires, que no ha participado en el estudio, afirma que tal vez no tenga una finalidad evolutiva en sí, pues podría tratarse «simplemente de una consecuencia fortuita de la estructura química de una sustancia presente en el tejido». —*Jim Daleya*

ETOLOGÍA

Alarma de mono

Algunas presas emiten gritos de advertencia que ahuyentan a los depredadores

La antropóloga Dara Adams andaba siguiendo a media docena de monos saki (*Pithecia sp.*) en la selva amazónica de Perú cuando, de improviso, comenzaron a chillar, aullar y ulular con frenesí. Poco después, sigiloso y negro como la noche, un jaguarundí descendió por el tronco de un castaño de Pará, brincó al suelo y se esfumó entre la espesura.

Son muchos los animales que recurren a gritos de alarma para advertir a sus congéneres de la presencia de intrusos, como ese pequeño felino. Pero tal explicación no convenció del todo a Adams, pues los monos no cesaron de gritar cuando todos los miembros del grupo ya estaban sobradamente prevenidos. Otra posibilidad más interesante es que se estuvieran dirigiendo al cazador, para espetarle algo como: «Sabemos que estás ahí. Desiste de tu emboscada».

Esta hipótesis, que los etólogos denominan «disuasión de la persecución», ha sido propuesta en estudios con aves, peces y mamíferos, pero la vasta mayoría presta atención a la presa y no aborda los efectos que esas vocalizaciones ejercen en el depredador, explica Adams. Así que, junto con su equipo de la Universidad Estatal de Ohio, decidió colocar collares radiotransmisores a dos ejemplares de ocelote, otro pequeño felino de la Amazonia peruana. Mientras seguían sus desplazamientos, recurrieron a un altavoz camuflado para reproducir grabaciones de los gritos de alarma de los titíes y los monos saki, presas también de este carnívoro. En ese mismo estudio reprodujeron también otro tipo de vocalizaciones sociales de estos primates.

Los gritos de alarma demostraron ser un elemento disuasor eficaz, pues los ocelotes se alejaron del altavoz. Al oír otros reclamos permanecieron inmóviles o se desplazaron en otras direcciones al azar, pero nunca se alejaron tanto como al escuchar los gritos, según describió el equipo el noviembre pasado en *Animal Behaviour*. «Nuestro estudio aporta las primeras pruebas experimentales de que los gritos de alarma de las presas ahuyentan a los carnívoros que cazan al acecho en condiciones naturales», explica Adams.

Como observador ajeno al estudio, Dan Blumstein, biólogo de la Universidad de California en Los Ángeles, coincide en que todo indica que las vocalizaciones disuaden a los felinos. Pero se pregunta: «¿Abandonan por temor a ser atacados por los monos? ¿O porque se saben descubiertos?».

—Jason G. Goldman



1



2

TITÍ ENMASCARADO (*Callicebus personatus*) (*1*) y ocelote (*Leopardus pardalis*) (*2*).

COGNICIÓN

Cociente intelectual interactivo

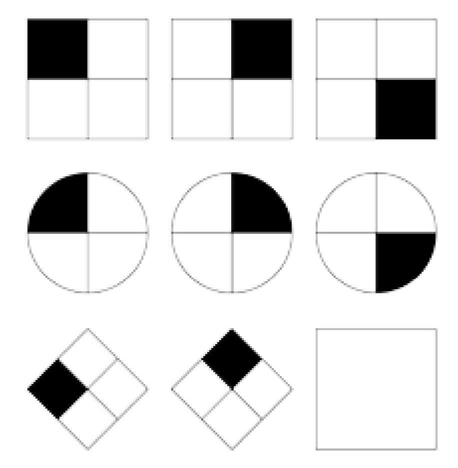
Un test de inteligencia en el que hay que mover figuras con un ratón predice mejor que su versión clásica el éxito en la vida real

Imagine jugar al dominó sin poder reorganizar las fichas o diseñar un edificio sin construir maquetas. Estos ejemplos demuestran la importancia de la interacción con el entorno en el pensamiento humano. Sin embargo, numerosos tests cognitivos miden solo nuestra capacidad de procesar mentalmente las cosas. Según un estudio reciente, un nuevo tipo de test de inteligencia que permite «exteriorizar» la resolución de problemas predice las calificaciones académicas mejor que la versión original en la que se basa.

En el popular test de inteligencia de las matrices progresivas de Raven, muchas preguntas se presentan en forma de una matriz 3 × 3 con figuras geométricas en sus entradas. De ellas hay una que falta, y los participantes deben completarla con la figura que mejor se ajusta a la pauta general. En la nueva versión, sin embargo, los sujetos deben primero organizar las otras ocho para crear un patrón coherente, arrastrándolas con el ratón por la pantalla de un ordenador.

Los creadores del nuevo test sometieron a 495 estudiantes universitarios holandeses a una de las dos evaluaciones. Aunque sus puntuaciones en el test original sí se correlacionaban con sus notas en los exámenes, las de la nueva prueba lo hacían considerablemente mejor. El estudio se publicó en febrero en *Nature Human Behavior*.

Los investigadores también hallaron que quienes obtuvieron mejores resultados tendían a mostrar rachas de actividad con momentos de calma entre medias. Los autores sospechan que, en lugar de mover las formas al azar hasta encontrar un patrón, esos estudiantes desarrollaban una idea, la ponían a prueba y entonces hacían una pausa para reflexionar antes de intentarlo con otra.



PRUEBA TÍPICA de un test tradicional de matrices progresivas de Raven.

INGENIERÍA

Detectives eléctricos

Un nuevo sistema de sensores es capaz de detectar cuándo un dispositivo eléctrico está a punto de averiarse

Vistos desde fuera, los motores diésel del buque *Spencer* de la Guardia Costera de EE.UU. parecían estar en buenas condiciones. Sin embargo, un sistema de sensores desarrollado recientemente indicaba que un conjunto de calentadores (dispositivos usados para facilitar el arranque del motor) se había averiado. Cuando la tripulación retiró la cubierta metálica, pudo comprobar que, en efecto, allí había cables corroídos y humeantes.

Los calentadores no solo habían quedado inservibles, sino que su aislamiento eléctrico se había deteriorado y estaba «al borde de provocar un incendio», explica Steven Leeb, profesor del Instituto de Tecnología de Massachusetts y autor principal de un estudio que describe el nuevo sistema, publicado en marzo en *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. «Nuestro contador eléctrico consiguió detectar los cambios graduales que se fueron produciendo a lo largo de un año y supo ver el momento en que se produjo un fallo grave.»



El sistema se basa en una técnica denominada «monitorización no invasiva de la carga» (NILM, por sus siglas en inglés). Tanto en barcos como en edificios, a menudo hay varios dispositivos conectados a una misma fuente de alimentación, y cada uno de ellos genera cambios únicos en el flujo de corriente. Un sensor NILM conectado a la instalación eléctrica puede extraer esas «huellas digitales» para determinar cuánta energía consume cada dispositivo. Aunque la NILM data de los años ochenta del siglo pasado, sus aplicaciones prácticas no han surgido hasta hace pocos años, a medida que las compañías eléctricas y varias empresas emergentes han comenzado a desarrollar contadores inteligentes para controlar el uso de la energía en viviendas y edificios.

El nuevo sistema procesa los datos de la NILM y muestra la información en un panel. «Los investigadores la han convertido en una

«Este desvío externo en el procesamiento de la información es precisamente lo que nos permite hallar soluciones afortunadas a problemas difíciles», explica Bruno Bocanegra, psicólogo de la Universidad Erasmus de Rotterdam y primer autor del artículo. «El nuevo test podría ser un valioso instrumento para evaluar la resolución de problemas en la vida real», opina Wendy Johnson, psicóloga de la Universidad de Edimburgo que no participó en la investigación y a quien le gustaría ver una versión del SAT (el examen de admisión a las universidades estadounidenses) que evaluase también el pensamiento exteriorizado.

«En general, creo que el artículo supone una gran contribución a este próspero campo», valora Gaëlle Vallée-Tourangeau, psicóloga de la Universidad de Kingston que ha hallado que interactuar con la realidad física ayuda a desarrollar la creatividad y el razonamiento estadístico. «Aún nos queda mucho por aprender, pero es hora de abandonar la idea obsoleta de que la mente no es más que un ordenador.»

—Matthew Hutson

herramienta útil», afirma David Irwin, profesor de ingeniería eléctrica de la Universidad de Massachusetts en Amherst que no participó en el estudio. Muchos proyectos académicos de NILM pueden resultar esotéricos, dice Irwin, pero el equipo de Leeb se ha centrado en su uso en la vida real y ha adaptado con éxito un sensor para aplicaciones comerciales.

Un sistema similar es capaz de alertar a los propietarios de una vivienda sobre electrodomésticos defectuosos y podría resultar clave en entornos industriales o militares. «El objetivo del diagnóstico es detectar cuándo se estropean las cosas y, mejor aún, pronosticar cuándo *podrían* estropearse», matiza Leeb. En el caso del motor del *Spencer*, la detección temprana del componente averiado permitió que la Guardia Costera lo reemplazara mientras el barco aún estaba atracado.

«A casi nadie le gusta que se estropee algo», añade, pero en los buques —así como en las refinerías, en el procesamiento de productos químicos, en fábricas o en edificios comerciales—, un elemento averiado puede inutilizar un sistema mucho mayor y acarrear graves consecuencias.

—Sophie Bushwick



JOVEN GALÁPAGO cuellicorto del Murray (*Emydura macquarii*), un quelonio cada vez más escaso.

DANITA DELIMONT, ALAMY

CONSERVACIÓN

Extinción a cámara lenta

La notoria longevidad de las tortugas puede enmascarar su declive

Hace casi cuarenta años, el zoólogo Michael Thompson, entonces en la Universidad de Adelaida, hizo un descubrimiento alarmante: los zorros comunes introducidos en Australia estaban devorando más del 90 por ciento de las puestas de tortuga en las márgenes del río Murray. Los censos de Thompson también revelaron un número desproporcionado de tortugas maduras, lo cual apuntaba a que la depredación ejercida por el zorro ya había reducido la población de juveniles en el río. Si no se tomaba ninguna medida, advirtió, las antaño abundantes tortugas acabarían desapareciendo.

Poco se ha hecho para evitarlo, y la predicción de Thompson tiene hoy visos de hacerse realidad. Un estudio reciente confirma que varias especies de galápagos han disminuido drásticamente o desaparecido de varios tramos del Murray. «El problema radica en que la longevidad de estos quelonios da una falsa percepción de persistencia», afirma Ricky Spencer, ecólogo de la Universidad de Sídney Occidental y coautor del estudio, que fue publicado en febrero en *Scientific Reports*. «Forma parte de la naturaleza humana añorar aquello que ya no se tiene.»

Spencer y sus colaboradores hicieron un censo de tres especies que eran abundantes décadas atrás: el galápago cuellilargo gigante (*Chelodina expansa*), el galápago cuellilargo oriental (*C. longicollis*) y el galápago cuellicorto del Murray (*Emydura macquarii*). Eligieron 52 puntos a lo largo de tramos meridionales del río para colocar trampas y dedujeron el tamaño de las poblaciones a partir del número de individuos capturados en un tiempo dado. Descubrieron así que habían desaparecido de lugares donde antes abundaban. Además, la mayoría de los ejemplares capturados eran de talla grande, probablemente viejos. Spencer y su equipo achacan las pérdidas a la depredación de las puestas por los zorros, agravado por otros problemas, como la degradación ambiental y la sequía severa de la década pasada.

«Hace décadas que conocemos el problema [de la desaparición de las tortugas], pero, a pesar del eco mediático que la crítica situación de nuestros ríos ha alcanzado en Australia, no se ha hecho nada por revertir la situación», lamenta Rick Shine, herpetólogo de la Universidad Macquarie, en Sídney, ajeno a la investigación. «Este artículo es una llamada de alerta de que, a menos que comencemos a actuar a gran escala en pos de la conservación de las tortugas, podríamos perder un componente fascinante de nuestra fauna autóctona.»

Los galápagos podrían recuperarse con rapidez si se tomaran medidas para proteger sus puestas y restaurar el hábitat, advierte Spencer. Pero la administración suele responder solo cuando las pérdidas alcanzan niveles de crisis, opina. Actualmente, las especies del río Murray carecen de protección federal. Él y sus colaboradores tienen una solución provisional: «Nuestro próximo paso es diseñar las medidas de conservación que la población puede emprender para las especies comunes. Así la gente podrá comenzar a hacer algo sin tener que esperar a la financiación del Gobierno».

—Rachel Nuwer



EL MARCAPASOS SIMBIÓTICO funciona con un generador diminuto (*en la fotografía*) alimentado por el latido cardíaco.

DE «SYMBIOTIC CARDIAC PACEMAKER», POR HAN OUYANG ET AL., EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 10, ART. N.° 1821; 2019

INGENIERÍA BIOMÉDICA

Marcapasos sin pila

La energía de los latidos consigue accionar un dispositivo experimental

Se ha ensayado con éxito un marcapasos alimentado por el latido cardíaco en cerdos vivos, cuyo corazón es similar en tamaño y funcionamiento al órgano humano. Los investigadores lo consideran un avance importante en el desarrollo de dispositivos médicos implantables sin pilas. Las pilas actuales de marcapasos tienen una vida útil de siete a diez años, y su sustitución exige una costosa operación quirúrgica.

El nuevo «marcapasos simbiótico» consta de tres componentes: un generador del tamaño de un sello que se fija quirúrgicamente y convierte la energía mecánica del corazón en energía eléctrica; un condensador que almacena esa energía; y el propio marcapasos, que estimula y regula el músculo cardíaco.

El equipo de investigación, encabezado por Zhou Li, del Instituto de Nanoenergía y Nanosistemas de Pequín, y Zhong Lin Wang, del Instituto de Tecnología de Georgia, EE.UU., implantó su dispositivo en dos cerdos macho adultos. En el primero (cuyo corazón estaba sano), el equipo supervisó la captación de energía por parte del generador; este impulsó el marcapasos durante casi tres horas y media. El corazón porcino generó energía más que suficiente para alimentar una versión humana del marcapasos, relataron en abril en *Nature Communications*. En el segundo cerdo, provocaron una arritmia (ritmo cardíaco irregular) para someter a prueba la función terapéutica del marcapasos. Cuando este se puso en marcha —tras haber sido cargado por el corazón del cerdo durante más de una hora—, los latidos recuperaron en poco tiempo el ritmo normal y permanecieron así incluso después de desconectarlo.

Con todo, no es probable que los ensayos en humanos comiencen pronto porque el tamaño, la seguridad y la eficacia del marcapasos todavía deben optimizarse. «La técnica supone un logro notable», afirma Patrick Wolf, ingeniero biomédico en la Universidad Duke, que no ha participado en el estudio. Pero advierte de que los problemas de tamaño y eficacia son importantes, y que antes habrá que determinar si el marcapasos funciona en un corazón enfermo y menos dinámico.

Otro inconveniente radica en que la unidad se debe acoplar directamente a la superficie del corazón, por lo que existe el riesgo de que interfiera con las funciones cardíacas. Un grupo conjunto del Colegio Dartmouth y la Universidad de Texas en San Antonio diseñó anteriormente un marcapasos que aprovecha la energía cinética de su propio cable guía, que se mueve cuando el corazón late. En la actualidad, el equipo está llevando a cabo ensayos en perros.

«El desarrollo de la tecnología sin pilas revolucionará los dispositivos implantables», asegura Ramsés Martínez, ingeniero industrial y biomédico en la Universidad Purdue, que no ha estado involucrado en ninguno de los estudios. «Pronto los implantes rígidos tradicionales evolucionarán en sistemas adaptables, capaces de obtener del paciente la energía que necesitan para funcionar.»

—*Harini Barath*

ALTAS ENERGÍAS

(Anti)partículas con encanto

Un hallazgo del LHC aporta nuevas pistas sobre lo que pudo haber sucedido con la antimateria del universo



EL EXPERIMENTO LHCb en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN.

Nuestro universo podría estar hecho de antimateria, pero no ocurre así. Los físicos creen que, en sus primeros instantes, el cosmos debió de contener casi la misma cantidad de materia que de antimateria. Pero, por alguna razón, la primera prevaleció sobre la segunda hasta dar lugar al universo que vemos hoy. Ahora podrían estar un poco más cerca de averiguar por qué.

Los investigadores del experimento LHCb, uno de los detectores que operan en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra, han descubierto que los quarks *encanto* (o *charm*, uno de los seis tipos de estas partículas que existen en la naturaleza) y sus versiones de antimateria no se comportan siempre igual. En un trabajo presentado hace poco en los Encuentros de Moriond, una gran conferencia anual celebrada en La Thuile, en Italia, los investigadores han hallado que las partículas inestables conocidas como mesones D^0, las cuales contienen quarks *encanto*, se desintegran en otras más estables a un ritmo ligeramente distinto del que lo hacen sus homólogos de antimateria. Tales diferencias podrían ayudar a entender cómo, después de la gran explosión, surgió la asimetría entre materia y antimateria que explica el universo actual. Los resultados se publicaron a finales de mayo en *Physical Review Letters*.

La materia y la antimateria se aniquilan mutuamente, y los físicos creen que este tipo de procesos destruyó casi toda la antimateria (y una gran parte de la materia) que existía inicialmente en el cosmos. Sin embargo, no entienden bien el origen de todo el exceso de materia que más tarde daría lugar a las galaxias, las estrellas y los planetas. Como consecuencia, hace tiempo que buscan diferencias en el comportamiento de la materia y la antimateria que puedan explicar ese desequilibrio en el universo temprano.

El desajuste recién descubierto entre procesos en los que intervienen quarks y antiquarks *encanto* resulta ser demasiado pequeño para dar cuenta de toda la materia presente en el universo actual. Sin embargo, el resultado «nos acerca más a la respuesta, pues muestra que una de las posibles explicaciones podría no ser la correcta», señala el físico teórico de Cornel, Yuval Grossman, quien no participó en el nuevo trabajo. «También estoy emocionado porque es la primera vez que vemos este fenómeno en quarks *encanto*», añade.

Hace tiempo que se conocen diferencias similares en otros tipos de partículas. Sin embargo, estas también son demasiado sutiles para explicar toda la materia existente en el cosmos. Los físicos albergan la esperanza de encontrar diferencias mucho mayores en otros procesos, como aquellos en los que participan los neutrinos o en reacciones en las que interviene el bosón de Higgs, apunta Sheldon Stone, físico de la Universidad de Siracusa y miembro del LHCb. «Hay en marcha un montón de búsquedas distintas», concluye el investigador.

—*Clara Moskowitz*

CERN (*LHC*); NASA (*astronauta*)

AGENDA

CONFERENCIAS

8 de julio
Cartografía del universo invisible
Priyamvada Natarajan, Universidad Yale
Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona
Barcelona
www.cccb.org

EXPOSICIONES

Átomos bajo el agua
Museo de la Ciencia y el Agua
Murcia
cienciayagua.org

De Madrid a la Luna
Espacio Fundación Telefónica
Madrid
espacio.fundaciontelefonica.com



Cien años del eclipse que le dio la razón a Einstein
Universidad de Barcelona
Barcelona
www.ub.edu

Mètode: 100 números de ciencia
Centro Cultural La Nau
Valencia
www.metode.es

OTROS

5-7 y 19-21 de julio — Festival
Splashdown Festival
Conferencias, talleres, cine, música y exposición
Dedicado al 50 aniversario de la llegada a la Luna
Barcelona (5-7 de julio)
Gijón (19-21 de julio)
www.splashdownfestival.space

Del 16 al 18 de julio — Jornadas
Física para tod@s
Conferencias, cine y experimentos
Organiza: Real Sociedad Española de Física
Zaragoza
eventos.unizar.es

ASTROPARTÍCULAS

¿Sopla el viento de materia oscura en el Pirineo aragonés?

El experimento ANAIS, en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, en Huesca, promete poner fin a una larga controversia relativa a la búsqueda de materia oscura

MARÍA LUISA SARSA



NASA/ESA/HARALD EBELING, UNIVERSIDAD DE HAWÁI EN MANOA/JEAN-PAUL KNEIB, LABORATORIO DE ASTROFÍSICA DE MARSELLA

EL CÚMULO DE GALAXIAS MACS J0717.5+3745, en una imagen compuesta por varias fotografías del telescopio espacial Hubble. En color azul se muestra la distribución de materia oscura, la cual ha sido inferida a partir de la distorsión gravitatoria que esta misteriosa forma de materia induce en la luz.

Hace ahora cien años, Sir Arthur Stanley Eddington dirigió la famosa expedición que estudió el eclipse de sol de 1919 y que proporcionó una de las primeras confirmaciones de la teoría de la relatividad general de Einstein. Al científico inglés se le atribuye una sugerente frase que podría resumir sus largos años de observación y estudio del universo: «No solo es el universo más extraño de lo que imaginamos; es más extraño de lo que podemos imaginar».

A pesar de los vertiginosos avances que desde entonces ha experimentado nuestra comprensión del cosmos, dicha máxima sigue vigente en pleno siglo XXI. A la par que se desarrollaba el modelo cosmológico imperante en la actualidad, puesto a prueba a lo largo de miles de millones de años luz, han ido apareciendo nuevas incógnitas. Hoy, todas las observaciones del universo (obtenidas mediante técnicas muy variadas y correspondientes a distancias y fases de su evolución muy distintas) confluyen en un resultado sorprendente: el 95 por ciento de la materia y la energía del cosmos se compone de dos ingredientes que son totalmente invisibles a nuestros métodos de observación tradicionales.

Conocidos respectivamente como «energía oscura» y «materia oscura», sabemos que existen por indicios indirectos: los efectos gravitatorios que generan a escala tanto galáctica como cósmica. Sin embargo, desconocemos por completo su naturaleza; para ninguna de estas dos componentes disponemos hoy por hoy de una explicación que no sea hipotética. A pesar de ello, el modelo cosmológico estándar da cuenta de todas las observaciones con una precisión sin precedentes. Ningún otro marco teórico propuesto hasta la fecha muestra una situación similar.

Los resultados más recientes indican que aproximadamente el 68 por ciento de la energía del universo se encuentra en forma de energía oscura, la cual está acelerando la expansión cósmica. La materia oscura representa el 27 por ciento y ha desempeñado un papel fundamental en los

procesos de agregación gravitatoria que han formado las estructuras que observamos en el universo actual: las galaxias y los cúmulos de galaxias. Desentrañar su naturaleza supondría un verdadero hito en astrofísica, cosmología y física de partículas.

La hipótesis más ampliamente aceptada sobre la materia oscura postula que esta se compone de partículas elementales diferentes de las que ya conocemos. Estas hipotéticas partículas deben ser masivas, lo que explicaría sus interacciones gravitatorias, pero interaccionarían muy debilmente mediante otros mecanismos, lo que explicaría por qué no podemos verlas. Tales partículas estarían distribuidas en halos en torno a las galaxias, en particular en la Vía Láctea, y atravesarían constantemente la Tierra. Y si tienen algún tipo de interacción (aparte de la gravitatoria) con la materia normal, deberían poder detectarse con un montaje experimental adecuado.

Ese es precisamente el objetivo del experimento ANAIS, acrónimo de Modulación Anual con Centelladores de Yoduro de Sodio, situado en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, en Huesca. Propuesto y dirigido por investigadores de la Universidad de Zaragoza, ANAIS comenzó sus mediciones en agosto de 2017. Tras un año y medio de toma de datos, sus primeros resultados se hicieron públicos el pasado mes de marzo. Aunque estos aún no son concluyentes, el experimento promete poner fin en un futuro próximo a una larga controversia que lleva cerca de dos décadas agitando este campo de investigación.

Fósiles del universo primitivo

Al igual que el fondo cósmico de microondas, las partículas de materia oscura serían reliquias del universo primitivo. Se habrían producido en ingentes cantidades poco después de la gran explosión y hoy seguirían a nuestro alrededor, formando gigantescos halos esféricos alrededor de las galaxias. Al modo de paleontólogos, los cosmólogos reconstruyen la historia del universo a partir de las huellas que han dejado las partículas que lo poblaron en el pasado remoto y analizando aquellos restos fósiles que han perdurado hasta nuestros días.

La búsqueda de materia oscura se aborda por medio de tres estrategias complementarias. Por un lado, las partículas que la componen podrían generarse en los aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. Por otro, las ocasionales aniquilaciones entre las partículas de materia oscura presentes en los halos de las galaxias podrían producir un pequeño exceso de positrones, fotones u otras partículas en la radiación cósmica, el cual tal vez podría ser identificado. Por último, los métodos de detección directa intentan observar las esporádicas interacciones que, a su paso por la Tierra, podrían experimentar las partículas de materia oscura con un material adecuado y muy bien aislado del entorno.

ANAIS pertenece a esta última clase de experimentos. Toma datos en el Pirineo oscense, bajo unos 850 metros de roca. La montaña hace de paraguas frente a la radiación cósmica (cascadas de partículas originadas en las capas altas de la atmósfera por la interacción con partículas muy energéticas de origen cósmico, y que bañan de manera constante la superficie terrestre). Sin embargo, no frena las partículas de materia oscura, las cuales atraviesan la roca como si fuera transparente.

ANAIS utiliza detectores de yoduro de sodio (NaI), un material centellador que emite breves destellos de luz cuando una partícula deposita energía en él. Los detectores de ANAIS son sensibles a depósitos energéticos producidos por partículas habituales del entorno (fotones, electrones, muones, etcétera), pero también por las partículas de materia oscura, que deberían dejar una señal en ellos, mayor o menor en función de su probabilidad de interacción con los núcleos atómicos del material del detector.

Viento oscuro

El objetivo de ANAIS consiste en estudiar el efecto denominado «modulación anual» en la señal de materia oscura. Las simulaciones de formación de estructuras cósmicas y la manera en que giran las estrellas en torno al centro de las galaxias indican que la materia oscura se distribuye en forma de gigantescos halos, o «nubes», alrededor de las galaxias. En estos, las partículas de materia oscura se hallarían en continuo movimiento aleatorio, como si se tratara de un gas encerrado en un gran globo invisible.

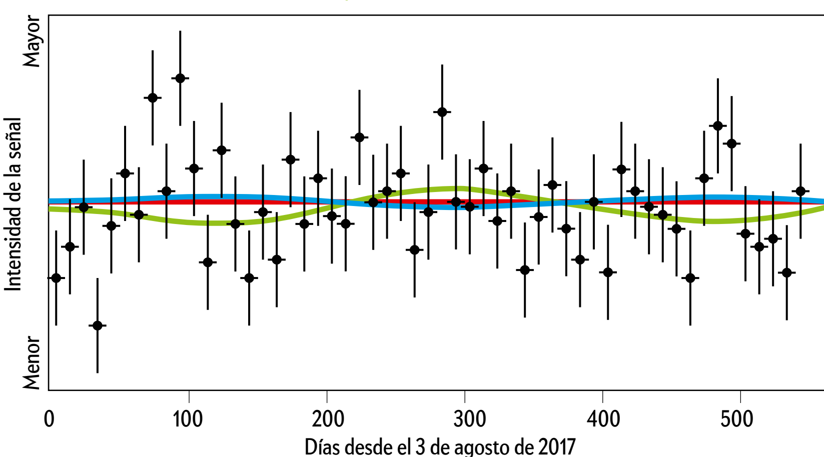
Sin embargo, un detector situado en la Tierra no vería llegar las partículas de materia oscura de direcciones aleatorias, sino preferentemente de la dirección que define la constelación del Cisne. Esto es debido a que, en la actualidad, el Sol se mueve en dicha dirección en su órbita alrededor del centro galáctico. Este efecto permite que imaginemos un «viento» de materia oscura que llega a la Tierra, algo similar a lo que vería un motorista que atravesase una nube de mosquitos.

Si incluimos en estas consideraciones el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol, con un período de un año, tenemos que la velocidad del planeta se suma o se resta a la del Sol en su movimiento en torno al centro galáctico. Como consecuencia, un experimento terrestre que detectase materia oscura



DETECTORES SUBTERRÁNEOS: Se cree que las partículas de materia oscura atraviesan constantemente la Tierra. Los nueve módulos del experimento ANAIS (*fotografía*), en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, contienen un total de 112,5 kilogramos de yoduro de sodio, un material que emite luz cuando una partícula deposita energía en él. Esta propiedad lo convierte en una sustancia adecuada para detectar las partículas de materia oscura a su paso por nuestro planeta.

COLABORACIÓN ANAIS



RESULTADOS EN CONFLICTO: Hace dos décadas que el experimento de búsqueda de materia oscura DAMA/LIBRA, en Italia, detecta una señal que oscila con periodicidad anual, justo lo que cabría esperar en el caso de una detección genuina de materia oscura. Sin embargo, otros experimentos que han usado detectores diferentes no han logrado reproducir dicho resultado. El experimento ANAIS, en Huesca, ha empleado por primera vez el mismo material y método de detección que DAMA/LIBRA. Sus primeros resultados (*cruces y curva azul*), correspondientes a un año y medio de toma de datos, son compatibles con una ausencia de modulación (*rojo*) y están en tensión con la señal de DAMA/LIBRA (*verde*), siendo incompatibles con ella con un 95 por ciento de nivel de confianza.

debería observar cambios de periodicidad anual en la intensidad de la señal. En primera aproximación, la señal debería variar según una curva en forma de coseno, con período de un año, un máximo hacia el 2 de junio y un mínimo en torno al 2 de diciembre.

El enigma de DAMA/LIBRA

Tales características son justamente las que desde hace tiempo observa en sus datos el experimento DAMA/LIBRA, un detector que opera desde hace dos décadas en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso, en Italia. La colaboración DAMA/LIBRA observa una modulación anual que los investigadores interpretan como detección de materia oscura galáctica. Ello se debe a que, hasta ahora, todos los intentos de explicar dicha modulación a partir de errores sistemáticos o fuentes de radiación conocidas han sido infructuosos.

A lo largo de estos años, sin embargo, otros experimentos que han alcanzado sensibilidades muy superiores a las de DAMA/LIBRA no han observado en sus datos ningún indicio de señales de materia oscura. No obstante, tales experimentos han usado materiales y métodos de detección distintos de los empleados por DAMA/LIBRA, por lo que la comparación entre ellos no es directa. Depende de los modelos considerados para las partículas de materia oscura y para su distribución en el halo galáctico.

Así pues, se hace necesaria una confirmación o refutación de los resultados de DAMA/LIBRA que no dependa del modelo de materia oscura considerado. Es aquí donde el experimento ANAIS cumple una función clave, ya que usa el mismo material y la misma técnica de detección que el proyecto italiano.

Primeros resultados

Aunque aún no son concluyentes, los primeros resultados de ANAIS se muestran compatibles con una ausencia de modulación. Con la sensibilidad alcanzada tras un año y medio de funcionamiento, los datos están en tensión con el resultado de DAMA/LIBRA, siendo incompatibles con él con una confianza cercana al 95 por ciento.

La sensibilidad de un experimento de este tipo aumenta a medida que pasa el tiempo y se van acumulando más datos. Los resultados obtenidos ahora confirman las estimaciones previas sobre su sensibilidad y permiten augurar que, en cinco años, ANAIS será capaz de confirmar o descartar el resultado de DAMA/LIBRA con una confianza de más del 99,9 por ciento.

Un experimento similar, COSINE-100, está tomando datos en el Laboratorio Subterráneo de Yangyang, en Corea del Sur. Sus primeros resultados se hicieron públicos unos días después que los de ANAIS. Por el momento, muestran una sensibilidad netamente inferior y dibujan una situación menos clara, ya que, con casi la misma confianza estadística, apoyan tanto una ausencia de modulación como una señal compatible con la de DAMA/LIBRA.

Aunque aún habremos de esperar hasta dar con una respuesta definitiva a este enigma, todo indica que ANAIS será una parte clave en la resolución del rompecabezas. Y sea cual sea la respuesta, aparecerán nuevas preguntas sobre las que investigar. Si los resultados de DAMA/LIBRA se confirman, ¿qué propiedades cabrá asignar a las partículas de materia oscura? En caso contrario, ¿qué ha estado causando la modulación observada durante dos décadas por el experimento italiano?

María Luisa Sarsa
investiga en el Departamento de Física Teórica de la Universidad de Zaragoza y es la investigadora principal del experimento ANAIS.

PARA SABER MÁS

First model independent results from DAMA/LIBRA—Phase2. Rita Bernabei et al. en *Universe*, vol. 4, n.º 11, art. 116, noviembre de 2018.
First results on dark matter annual modulation from ANAIS-112 experiment. Julio C. Amaré et al. en *Physical Review Letters* (en prensa). Disponible en **arxiv.org/abs/1903.03973**, marzo de 2019.
Search for a dark matter-induced annual modulation signal in NaI(Tl) with the COSINE-100 experiment. G. Adhikari et al. Disponible en **arxiv.org/abs/1903.10098**, marzo de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Materia oscura compleja. Bogdan A. Dobrescu y Don Lincoln en *IyC*, septiembre de 2015.
¿Qué es la materia oscura? Lisa Randall en *IyC*, agosto de 2018.
¿Es real la materia oscura? Sabine Hossenfelder y Stacy S. McGaugh en *IyC*, octubre de 2018.

ECOLOGÍA

Migración de las plantas andinas ante el cambio climático

En su desplazamiento hacia mayores altitudes, más frías, tropiezan con algunas barreras ecológicas

BELÉN FADRIQUE



KENNETH J. FEELEY

LOS BOSQUES ANDINOS, un «punto caliente» de la biodiversidad mundial, están experimentando cambios en su composición de especies a causa del calentamiento del planeta.

Una de las principales amenazas para las comunidades vegetales de nuestro planeta es el cambio climático. La supervivencia y el rendimiento de las plantas dependen en gran medida de la temperatura ambiental. Varios estudios indican que el calentamiento global está alterando la distribución de las especies y está generando cambios en la composición de los ecosistemas forestales en distintos lugares del mundo. Sin embargo, no se conoce bien cómo está afectando a los bosques de los Andes. Comprender el efecto que ejerce el cambio climático en las comunidades vegetales andinas es crucial para mejorar su gestión y fomentar su conservación.

Los Andes albergan algunos de los ecosistemas más notables de la Tierra, caracterizados por su extraordinaria diversidad de especies y abundancia de endemismos vegetales y animales. Además, ejercen un papel destacado en los ciclos biogeoquímicos y climáticos mundiales. Pero, a pesar de su importancia y las múltiples presiones antrópicas a lAs que están sometidos, los ecosistemas andinos continúan siendo poco estudiados.

Trabajos anteriores realizados, entre otros, por investigadores de nuestro grupo de la Universidad de Miami demostraron que, en lugares específicos de los Andes, el calentamiento había provocado un desplazamiento, o migración, de varias plantas hacia bosques de mayor altitud. Pero se desconocía si la cordillera en su

LAS NUBES cubren a diario ciertas elevaciones de los Andes y dan lugar al ecosistema denominado bosque nublado (*izquierda*). La transición entre el bosque premontano y el nublado y entre el límite superior del bosque y el pastizal constituyen importantes barreras ecológicas para la migración en altura de las especies vegetales en respuesta al calentamiento global (*derecha*).

conjunto estaba experimentando cambios generalizados en la distribución de las especies y, por tanto, en la composición de las comunidades. Tampoco se sabía si estos desplazamientos eran uniformes a lo largo del gradiente altitudinal. La migración en altura es, en definitiva, un cambio en la distribución geográfica de una especie, que se produce mediante un aumento de la mortalidad en su límite inferior de distribución y el reclutamiento de individuos nuevos más allá del límite superior.

De este modo, nuestro grupo se dispuso a comprobar si las migraciones se estaban produciendo de forma generalizada en un conjunto de parcelas forestales mucho más numeroso y distribuido a lo largo de los Andes. Nuestros resultados, publicados en *Nature* en noviembre de 2018, demuestran que, en efecto, el fenómeno es habitual, aunque la migración no se da de forma uniforme en altura, ya que las plantas se encuentran con ciertas barreras ecológicas que obstaculizan su desplazamiento.

Ascenso con obstáculos

La colaboración de numerosos investigadores a través de una red de monitoreo, la Red de Bosques Andinos del Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina, ayudó a responder preguntas a gran escala sobre el efecto del cambio climático en los bosques de la cordillera.

Se recopilaron datos de casi 200 parcelas de inventario forestal que abarcan más de 3000 metros de desnivel (entre 360 y 3360 metros) y se extienden desde los Andes tropicales del norte de Colombia hasta los Andes subtropicales del norte de Argentina, con parcelas también en Ecuador y Perú. En cada una de ellas, se marcaron e identificaron, hasta el nivel de especie, todos los árboles, y se midió su diámetro. En 64 parcelas, los censos se han repetido y datan desde 1991.

En este punto deseo destacar que el trabajo de campo en los Andes es complicado debido a las inclemencias del tiempo, la difícil accesibilidad del terreno y las pendientes pronunciadas. Sin el esfuerzo de numerosos científicos y colaboradores no habría sido posible el muestreo de todas las parcelas.

Tras compilar la base de datos, primero realizamos una homogenización taxonómica (por ejemplo, asignamos un mismo nombre a una especie que tiene dos nombres científicos sinónimos). A continuación, calculamos el óptimo térmico para cada especie en base a la temperatura media anual de las coordenadas donde se había informado con anterioridad la presencia de dicha especie, es decir, en función de su distribución geográfica conocida.

El análisis de los datos ha demostrado que la mayoría de las parcelas con múltiples censos presentan cada vez un mayor número de especies con óptimos térmicos más altos, es decir, propias de zonas más bajas y cálidas. Esto apoya la idea de que el calentamiento global está causando que las áreas de distribución de las especies se desplacen hacia zonas más frías (más altas). La migración de las plantas, o más específicamente, la termofilización (el aumento en la abundancia relativa de especies tolerantes al calor) se está produciendo de manera generalizada a lo largo de los Andes. Este aumento se ha correspondido con un ascenso de la temperatura media en las parcelas de 0,06 grados centígrados al año desde 1990.

Asimismo, utilizando un método estadístico que nos permite analizar todas las parcelas (incluidas las de un solo censo), hemos descubierto que las tasas de migración varían según la elevación. Esto significa que no todos los cinturones altitudinales se están desplazando de manera sincrónica. Al contrario, el fenómeno parece ser más lento o nulo en las cotas más altas y medias. Estas corresponden a ecotonos (zonas de transición entre dos hábitats) muy marcados. En particular, los ecotonos entre la línea arbórea (límite superior del bosque) y el pastizal y entre el bosque premontano y el bosque nublado muestran una migración nula o negativa. Es posible que los cambios bruscos en las condiciones ambientales (temperatura, exposición solar, humedad

KENNETH J. FEELEY

relativa) y en las interacciones bióticas (competencia, herbivoría) que se dan en estas zonas de transición reduzcan el éxito de colonización de las especies migrantes.

Finalmente, hemos encontrado que, en promedio, las especies vegetales están migrando a una velocidad diez veces inferior a lo que sería deseable para que se mantuvieran en equilibrio con la velocidad a la que están ascendiendo las temperaturas.

En conclusión, dadas las tasas de migración extremadamente lentas, la existencia de barreras y la migración asincrónica de las comunidades de plantas a través de los Andes, muchas especies pueden estar en alto riesgo de extinción.

Este estudio demuestra que el trabajo de campo, el seguimiento continuo de las parcelas forestales y la colaboración de los investigadores resultan cruciales para registrar el impacto del cambio climático en los Andes. En los próximos años esperamos seguir trabajando en este tema para desentrañar los mecanismos que llevan a las variaciones en la abundancia de especies, al éxito de algunas de ellas y al fracaso de muchas otras. Conocerlos nos ayudará a predecir y tal vez mitigar los efectos del calentamiento global en los bosques tropicales.

Belén Fadrique *es investigadora del Departamento de Biología de la Universidad de Miami.*

PARA SABER MÁS

Climate change and the ecologist. Wilfried Thuiller en *Nature*, vol. 448, págs. 550-552, agosto de 2007.

Upslope migration of Andean trees. Kenneth J. Feeley et al. en *Journal of Biogeography*, vol. 38, n.º 4, págs. 783-791, abril de 2011.

Widespread but heterogeneous responses of Andean forests to climate change. Belén Fadrique et al. en *Nature*, vol. 564, págs. 207-212, noviembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ascenso en altitud de la vegetación de montaña. José Luis Benito Alonso en *IyC*, mayo de 2014.

Ayudar a los bosques a adaptarse al cambio climático. Hillary Rosner en *IyC*, diciembre de 2015.

BIOMEDICINA

Freno a la psoriasis

La inactivación de la proteína inmunitaria CD6 atenúa la enfermedad en ratones. Ello abre la puerta al desarrollo de nuevos tratamientos

MARTA CONSUEGRA FERNÁNDEZ Y FRANCISCO LOZANO

El sistema inmunitario está formado por una compleja red de células, tejidos y órganos que funcionan conjuntamente con el objetivo de defendernos frente a agresiones externas e internas. Reconoce los gérmenes invasores y ayuda a eliminarlos con el fin de que no supongan una amenaza para nuestro organismo. Sin embargo, cuando no funciona adecuadamente, puede originar varias enfermedades: alergias (respuestas inmunitarias contra sustancias que no son dañinas), inmunodeficiencias (trastornos originados por un funcionamiento defectuoso o insuficiente de nuestras defensas frente a una infección) y enfermedades autoinmunitarias (cuando las defensas atacan por error células de nuestro cuerpo). A este último grupo pertenece la psoriasis, una enfermedad inflamatoria crónica de la piel que afecta a más de 125 millones de personas en todo el mundo.

Si bien todavía no existe cura para este trastorno autoinmunitario, nuevos hallazgos sobre su fisiopatología han allanado el camino para el desarrollo de futuros tratamientos. En un trabajo publicado en la revista *Cellular & Molecular Immunology,* nuestro equipo ha ahondado en el potencial terapéutico de una proteína del sistema inmunitario llamada CD6. Mediante ensayos en ratones, por un lado, y el estudio del gen *CD6* en pacientes humanos, por otro, hemos llegado a la conclusión de que la inactivación de esta proteína permitiría atenuar la psoriasis.

CD6: Pieza clave en la respuesta inmunitaria

La psoriasis se caracteriza por lesiones cutáneas que pueden tomar distintas formas clínicas, siendo la más extendida la llamada «vulgar». Esta variante presenta lesiones escamosas y rojizas que producen picor y se distribuyen de forma simétrica por todo el cuerpo, afectando con mayor frecuencia el cuero cabelludo, los codos, las rodillas y la región sacra.

Es una enfermedad multifactorial, es decir, que existe predisposición genética en las personas que la padecen, pero también suele verse afectada por factores desencadenantes como el estrés, los traumatismos o las infecciones. Además, los síntomas pueden manifestarse de forma lenta o repentina, e incluso desaparecer durante un período de tiempo.

Aunque parte de la fisiopatología de esta enfermedad todavía se desconoce, sí se ha observado que entraña una activación anómala de los linfocitos T. Ello da lugar a una hiperproliferación de las células de la última capa de la piel, los queranocitos: crecen mucho más rápido de lo habitual y se acumulan en la capa córnea, la más externa de la epidermis, originando un engrosamiento de la piel y las conocidas placas psoriásicas. La aceleración del proceso de renovación de la piel hace que el recambio celular dure solo entre tres y cuatro días, cuando, en una epidermis sana, tarda unos 28 días.

En la superficie de los linfocitos T se aloja una proteína cuya función resulta esencial en la maduración de los mismos y en la regulación de la respuesta inmunitaria. Nos referimos al receptor CD6.

Esta proteína se ha vinculado al mecanismo patológico de varias enfermedades autoinmunitarias. En primer lugar, se ha visto que *CD6* opera como un gen de predisposición en la esclerosis múltiple y la artritis reumatoide, es decir, que varios polimorfismos de este gen (variaciones de la secuencia de ADN conocidas como SNP, de *single nucleotide polymorphism*) predisponen a desarrollar estas patologías. Asimismo, se han relacionado ciertos cambios en la expresión de *CD6* con la llamada arteritis de células gigantes, un trastorno que origina una inflamación de las arterias del cuero cabelludo, el cuello

y los brazos. Y en el síndrome de Sjögren, caracterizado por una disfunción de las glándulas salivares y lacrimales, la proteína CD6 se encuentra aumentada en el suero de los pacientes que la padecen, lo que sugiere que estaría implicada en la respuesta inmunitaria anómala propia de esta enfermedad.

En la bibliografía científica se recogen algunos ensayos con anticuerpos contra CD6 en el tratamiento de distintas enfermedades autoinmunitarias, entre las que encontramos la artritis reumatoide, la diabetes mellitus o incluso la psoriasis. Sin embargo, la ausencia de suficientes pruebas experimentales y el hecho de que no se comprenda bien cuál es la contribución de CD6 en la fisiopatología autoinmunitaria ha dificultado su ulterior desarrollo como herramienta terapéutica.

Los experimentos con ratones

La relación entre el CD6 y la psoriasis se descubrió hace veinte años cuando, sin contar con ningún antecedente ni resultados previos, un grupo de investigadores dirigido por Rolando Pérez, del Centro de Inmunología Molecular de la Habana, trató con éxito a un paciente con psoriasis mediante un anticuerpo contra CD6. Desde entonces, estos autores han intentado obtener datos que permitan, por un lado, confirmar los resultados, y por otro, dilucidar la implicación de esta proteína en los mecanismos biológicos de la psoriasis. No obstante, los datos conseguidos hasta la fecha son ambiguos.

Con el objetivo de ahondar en el papel que desempeña el receptor CD6 en la psoriasis, inducimos el trastorno en ratones modificados genéticamente para que presentaran una deficiencia de CD6 y los comparamos con su grupo de control (ratones con CD6). Así podríamos ver cómo afectaba la ausencia de esta proteína en el desarrollo de la enfermedad.

Para ello, rasuramos el vello de la parte inferior dorsal de los múridos y aplicamos diariamente durante 6 días Imiquimod (crema que provoca una inflamación que da lugar a lesiones muy parecidas a las placas psoriásicas de los pacientes humanos). A lo largo de este período, evaluamos la progresión de la enfermedad mediante la cuantificación de tres tipos de daño: enrojecimiento (eritema), descamación y engrosamiento de la piel (para la valoración de este último parámetro se tomaron muestras de la parte afectada).

Estos experimentos nos permitieron observar que los ratones sin CD6 presentaban unas lesiones más leves que los ratones con CD6. Además, los primeros mostraban niveles inferiores de citocinas o moléculas inflamatorias y un menor número de células inmunitarias que habían migrado a la lesión. En otras palabras: la ausencia de CD6 estaba atenuando la respuesta inmunitaria.

Después de obtener esos resultados en ratones, nos propusimos estudiar la relación entre el CD6 y la psoriasis en humanos.

Los estudios con humanos

Hasta la fecha, no se ha descrito ningún caso de una deficiencia o ausencia de CD6 en humanos que permita estudiar posibles anomalías asociadas a este receptor. No obstante, dado que varios SNP se han relacionado con algunas enfermedades autoinmunitarias, decidimos analizar la secuencia de ADN del gen *CD6* de más de trescientos pacientes con psoriasis procedentes de tres centros: el Hospital Clínico de Barcelona, el Hospital Trias y Pujol de Badalona y el Hospital Parque Taulí de Sabadell.

Una vez obtenida la secuencia de *CD6* de todos los pacientes, se relacionó cada SNP con el grado de intensidad de la enfermedad. Este se evaluó a partir de cinco factores: la puntuación obtenida en



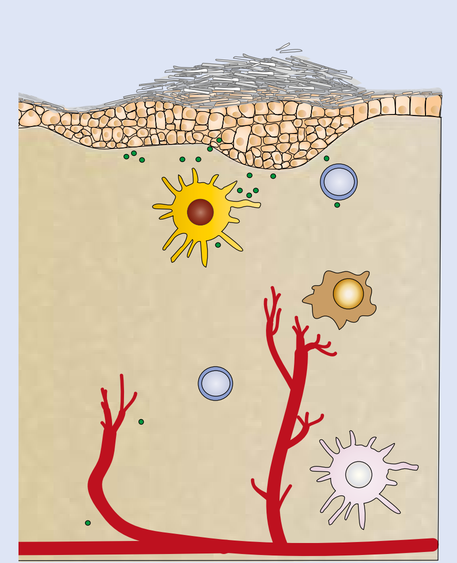
LAS LESIONES ESCAMOSAS Y ROJIZAS se distribuyen de forma simétrica por todo el cuerpo en los pacientes con psoriasis vulgar.

UN TALÓN DE AQUILES MOLECULAR

LAS PLACAS QUE APARECEN en la piel de los pacientes con psoriasis se forman cuando, por error, se produce la activación de ciertas células inmunitarias (linfocitos, macrófagos, células dendríticas y células de Langerhans), que migran hasta el foco de la lesión; allí liberan citocinas, que promueven la inflamación. Ello da lugar a la dilatación de los vasos sanguíneos, el engrosamiento de la epidermis y la hiperproliferación de los queranocitos (las células de la última capa de la piel), que se acumulan y forman la placa (*izquierda*).

En toda esta disfunción del sistema inmunitario hay una molécula que desempeña una función clave: el receptor CD6, una proteína que se aloja en la superficie de los linfocitos T. Experimentos realizados con ratones modificados genéticamente para que presentaran una deficiencia de CD6 han demostrado que la carencia de esta proteína atenúa la respuesta inmunitaria y, por tanto, el desarrollo de la enfermedad. Se ha observado que, en ausencia de CD6, disminuye la migración de células inmunitarias a la zona lesionada y, con ello, los niveles de citocinas, lo que conlleva una reducción de la placa (*derecha*).

Todo apunta, pues, a que CD6 podría ser una diana terapéutica para este molesto trastorno, todavía sin cura.



el índice PASI (por las siglas en inglés de «índice de gravedad del área de psoriasis»), la necesidad de recibir tratamiento permanentemente, la edad de debut de la enfermedad, la existencia de antecedentes familiares y la presencia de artritis psoriásica.

El análisis de la información recabada reveló que todos los SNP de *CD6* estudiados afectaban a la intensidad de la enfermedad, así como a la edad de aparición de la misma. Es decir, que en función de la secuencia del SNP, las lesiones de los pacientes eran más o menos graves y la enfermedad tenía un debut más o menos precoz. Ello no significa que exista una predisposición genética a la enfermedad (como en el caso de la esclerosis múltiple), sino que, en la psoriasis, el gen *CD6* actuaría como un modificador genético en aquellos pacientes que ya la padecen. Por tanto, conocer la secuencia de ese gen podría resultar de gran utilidad para pronosticar el progreso de la enfermedad e incluso prever la respuesta a ciertos tratamientos.

A la espera de nuevos estudios que confirmen nuestras observaciones, todo apunta a que el receptor CD6 constituye una diana con potencial terapéutico para la psoriasis.

PARA SABER MÁS

The link between CD6 and autoimmunity: Genetic and cellular associations. David Kofler et al. en *Current Drug Targets*, vol. 17, págs. 651-665, febrero de 2016.
Clinical and experimental evidence for targeting CD6 in immune-based disorders. Marta Consuegra-Fernández et al. en *Autoimmunity Reviews*, vol. 17, págs. 493-503, mayo de 2018.
Genetic and experimental evidence for the involvement of the CD6 lymphocyte receptor in psoriasis. Marta Consuegra-Fernández et al. en *Cellular and Molecular Immunology*, vol. 15, págs. 898-906, octubre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

La desesperante sensación de picor. Stephani Sutherland en *IyC*, julio de 2016.

Marta Consuegra Fernández *es doctora en biomedicina por la Universidad de Barcelona e investiga en el Instituto de Investigación Biomédica de Barcelona.*

Francisco Lozano *es consultor sénior del Servicio de Inmunología del Hospital Clínico de Barcelona y profesor titular de inmunología en la Universidad de Barcelona.*

MARTA CONSUEGRA



UN PEQUEÑO PASO

Las huellas de una hazaña insólita medio siglo después

NEIL ARMSTRONG estimaba en un 50 por ciento la probabilidad de éxito. «Había demasiadas incógnitas», confesaba en una entrevista concedida en 2011 por el primer hombre que pisó la Luna. «Había muchas posibilidades de que nos encontráramos con algo que no entendiésemos del todo y tuviéramos que abortar la misión y regresar a casa sin alunizar.» Que hace medio siglo él, Buzz Aldrin y Michael Collins —con la ayuda de los miles de ingenieros, científicos y controladores de misión de la NASA— lograsen alunizar continúa siendo una de las proezas más increíbles de la humanidad.

Un mes de julio de 1969, un cohete Saturno V de 36 pisos de altura y con un peso equivalente al de 500 elefantes despegó impulsado por una explosión que superaba la potencia de salida de 85 grandes presas. Una vez en el espacio, los astronautas abandonaron la órbita terrestre, pusieron rumbo a la Luna y, una vez en órbita en torno al satélite, desacoplaron el módulo lunar y lo posaron en la superficie. Tal vez más impresionante aún, tras la exploración Armstrong y Aldrin volvieron a subir al módulo, despegaron desde el suelo de otro mundo (otra hazaña sin precedentes) y se reunieron con el módulo de mando que esperaba a unos 100 kilómetros de altitud. Tres días después, regresaban a la Tierra y amerizaban a salvo en el océano Pacífico.

Tras semejante proeza fueron muchos quienes imaginaron que las colonias en la Luna y las vacaciones en Marte estaban a la vuelta de la esquina. Sin embargo, nadie ha vuelto a pisar el satélite desde que en 1972 lo hiciera el último astronauta del programa Apolo, y hoy los planes para enviar misiones tripuladas a Marte o a cualquier otro lugar del sistema solar apenas están más definidos de lo que lo estaban entonces.

Con todo, el quincuagésimo aniversario de la misión Apolo 11 nos recuerda que un objetivo tan disparatadamente ambicioso es viable, como ya quedó demostrado en una época en la que los ordenadores ocupaban habitaciones enteras, Estados Unidos perdía la guerra de Vietnam, las mujeres exigían igualdad en las calles y los afroamericanos luchaban para ser tratados como seres humanos de pleno derecho. El programa Apolo no fue la encarnación de ninguna época dorada, sino la demostración de que incluso en tiempos sombríos pueden conseguirse grandes cosas. Hoy tal vez nos vendría bien soñar de nuevo con la Luna, tanto si volvemos a ella como si no.

—*Clara Moskowitz*

HUELLA de Buzz Aldrin sobre la superficie lunar.

GETTY IMAGES (*huella*); NASA (*Aldrin en la superficie lunar, sala de control, astronautas y Armstrong*)



ATRÁS EN EL TIEMPO

ALDRIN junto al Experimento de Composición del Viento Solar.

CONTROLADORES del Centro Espacial Kennedy en el momento del lanzamiento del Apolo 11, el 16 de julio de 1969.

LA TRIPULACIÓN del Apolo 11 se despide antes de despegar.

UN EMOCIONADO Neil Armstrong en el módulo lunar, justo después de haber finalizado la exploración a pie de la superficie del satélite.



EL MO

RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL de la Base de la Tranquilidad, el lugar donde alunizó el *Eagle*. Las imágenes obtenidas en 2012 por la sonda de la NASA *Lunar Reconnaisance Orbiter* han permitido cartografiar con un detalle sin precedentes el recorrido de los astronautas y los últimos minutos del alunizaje (*págs. 26 y 27*), la fase más compleja de toda la misión.

FUENTES: NASA/GSFC/UNIVERSIDAD ESTATAL DE ARIZONA (*Luna*); NASA (*astronautas y equipamiento*)

Eduardo García Llama es físico e ingeniero de operaciones espaciales. Trabaja en la sección de mecánica de vuelo del Centro Espacial Johnson de la NASA, en Houston. Es autor de *Apolo 11: La apasionante historia de cómo el hombre pisó la Luna por primera vez* (Crítica, 2019).



MENTO MÁS DIFÍCIL

EL ALUNIZAJE DEL APOLO 11 TUVO QUE SUPERAR TODA UNA SERIE DE COMPLICACIONES IMPREVISTAS. ALGUNAS DE ELLAS ESTUVIERON A PUNTO DE HACER ABORTAR LA MISIÓN

Eduardo García Llama

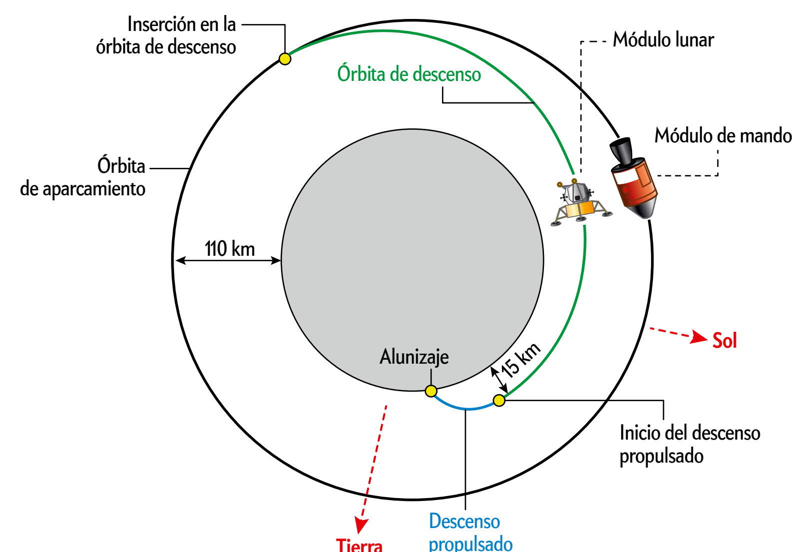
Ilustraciones de Edward Bell

El 20 de julio de 1969 a las 20:17 UTC (una hora más en la España peninsular), el módulo lunar de la misión Apolo 11, el *Eagle*, se posaba con éxito sobre la superficie del satélite. En él viajaban Neil Armstrong, comandante de la misión, y Buzz Aldrin, piloto del módulo lunar. Arriba, a 110 kilómetros de altitud, había quedado en órbita el módulo de mando, pilotado por Michael Collins. Unas 22 horas después (que incluyeron numerosos preparativos dentro de la nave, un paseo lunar de más de dos horas y otras siete de sueño de la tripulación), Armstrong y Aldrin encendieron la etapa superior del *Eagle* y, usando la inferior como plataforma de lanzamiento, despegaron y salieron al encuentro con Collins. Tras ensamblar con éxito la etapa de ascenso al módulo de mando, entraron en él, se deshicieron del *Eagle* y emprendieron el camino de regreso. Tres días después, el 24 de julio, los tres astronautas llegaban sanos y salvos a la Tierra.

Pequeño Cráter Occidental

Atrás quedaba la histórica llegada de los primeros seres humanos a otro mundo. Sin embargo, durante el descenso del *Eagle* se produjeron numerosos imprevistos que tuvieron que ser sorteados en tiempo real por la tripulación y por el equipo de control en Houston.

Persistentes dificultades en las comunicaciones, la aparición de varias alarmas inesperadas a bordo y un error en la navegación complicaron aún más una fase de vuelo que se acometía por primera vez en la historia y que era, de por sí, la más crítica y difícil de toda la misión. A todo ello se unió la amenaza de una inestabilidad en el motor de descenso. Solo este hecho, desconocido para todos durante la misión, pudo haber supuesto el aborto del descenso propulsado en el mejor de los casos y, en el peor de ellos, consecuencias fatales para los astronautas.



ÓRBITA DE DESCENSO: Para alunizar, el módulo *Eagle* tuvo primero que abandonar el módulo de mando pilotado por Collins, el cual permaneció en la órbita de aparcamiento a unos 110 kilómetros de altitud. Para ello, entró en una órbita elíptica (*verde*) que se inició sobre la cara oculta de la Luna y que se prolongó durante cerca de una hora. Al alcanzar el perilunio, a unos 15 kilómetros de altitud, se inició la fase de descenso propulsado (*azul*).

DESCENSO A LA LUNA

El conjunto de maniobras que debía efectuar el *Eagle* para abandonar el módulo de mando y posarse sobre la superficie lunar se dividía en dos fases: la inserción en la órbita de descenso y el descenso propulsado. La primera se inició sobre la cara oculta de la Luna con el encendido del motor de descenso del *Eagle* (*véase el esquema* «Órbita de descenso»). El objetivo era abandonar la órbita de aparcamiento del módulo de mando, el cual permanecería girando a una altitud de unos 110 kilómetros. El encendido del motor, de apenas medio minuto de duración, impartió un cambio de velocidad que colocó al *Eagle* en una órbita elíptica que lo fue acercando progresivamente a la superficie lunar. Media revolución después, al llegar al perilunio (el punto de la órbita más próximo al satélite), tuvo lugar el inicio del descenso propulsado.

Este comenzó a algo más de 15 kilómetros de altitud y a unos 460 kilómetros de distancia del lugar planeado de alunizaje. En ese momento la altitud del *Eagle* se había reducido en unos 95 kilómetros, pero su velocidad no había corrido la misma suerte. Las leyes de la mecánica dictan que, en una órbita elíptica, la velocidad aumenta cuando nos acercamos al centro de atracción. Como consecuencia, el *Eagle* había incrementado su velocidad desde los algo más de 5760 kilómetros por hora a los que viajaba en la órbita de aparcamiento hasta unos 7560 kilómetros por hora al llegar al perilunio. Entonces se produjo de nuevo la ignición del motor, que ya no se apagaría hasta que el *Eagle* estuviera posado sobre la superficie, 12 minutos y 38 segundos más tarde.

El descenso propulsado constaba a su vez de tres fases: frenado, aproximación y alunizaje (*véase el esquema* «Descenso propulsado»). La primera de ellas era la de mayor duración, de 8 minutos y 30 segundos. Tenía por objetivo reducir la velocidad del *Eagle* de la manera más óptima en términos de consumo de combustible, a la vez que se reducía la altitud.

La fase de aproximación comenzó a una altitud de unos 2 kilómetros y cuando la distancia al lugar planeado de alunizaje era algo superior a los 8 kilómetros. Al inicio de esta fase, el *Eagle* volaba «cara arriba»; es decir, con las ventanillas orientadas hacia el cielo. Pero, a lo largo de los casi 2 minutos que duró la aproximación, la nave fue cabeceando progresivamente (adoptando una posición cada vez más vertical), de modo que Armstrong y Aldrin pudieran ver la superficie del satélite e inspeccionar la zona.

El alunizaje se iniciaba en un punto arbitrario que, en el caso del Apolo 11, tuvo lugar a 122 metros de altitud, cuando el *Eagle* se encontraba a unos 700 metros del lugar en el que se acabaría posando la nave. En ese momento, en el que el *Eagle* ya había reducido la velocidad a casi 65 kilómetros por hora, Armstrong asumió el control manual de la nave, que hasta entonces había volado de forma guiada, para acabar alunizando en el lugar que juzgó más adecuado.

FALLOS EN LAS COMUNICACIONES

Los problemas en las comunicaciones con Houston comenzaron desde el mismo momento de la adquisición de la señal, cuando el *Eagle*, ya en la órbita de descenso, se hizo visible desde la Tierra tras aparecer por encima del horizonte lunar. Tales fa-

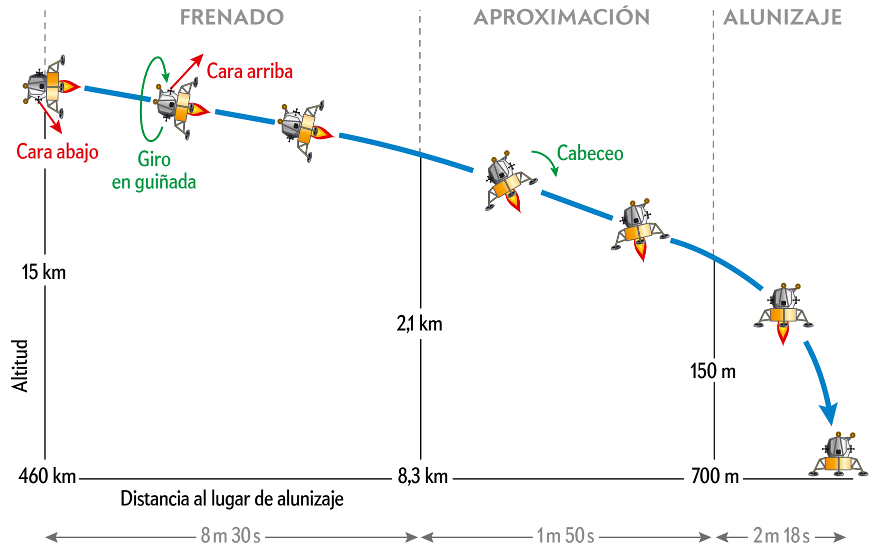
EN SÍNTESIS

El 20 de julio de 1969, el Apolo 11 acometió el primer alunizaje tripulado de la historia. Las misiones anteriores del programa Apolo habían ensayado las fases previas del vuelo, pero cómo transcurriría el alunizaje era una incógnita.

El descenso del módulo lunar tuvo que superar numerosas dificultades imprevistas. Entre ellas, problemas en las comunicaciones, fallos en el sistema de navegación y la aparición de varias alarmas de origen desconocido.

El *Eagle* se posó sobre la superficie lunar pocos segundos antes de agotar el combustible. Además, un fallo en el sistema de control del motor estuvo a punto de tornarlo inestable, lo que habría podido tener consecuencias fatales.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR



DESCENSO PROPULSADO: Al final de la órbita de descenso, la velocidad del *Eagle* era de unos 7560 kilómetros por hora. En ese momento se encendió el motor y comenzó el descenso propulsado. Este constó de tres fases: frenado (para reducir la velocidad de la nave, además de la altitud), aproximación (para posicionarla mientras descendía) y alunizaje. En esta última, Armstrong tomó el control manual del *Eagle*. Todo ello ocurrió en menos de 13 minutos.

llos se sucedieron de forma intermitente durante los siguientes 40 minutos, hasta casi la fase de aproximación.

Durante el descenso, las comunicaciones con la Tierra debían realizarse a través de una antena denominada «de alta ganancia». Esta permitía el envío de grandes cantidades de información y posibilitaba a los controladores en Houston comprobar el estado de los sistemas de a bordo. La antena podía operar en dos modos: automático o manual. En el modo automático, la antena se orientaba de forma autónoma hacia la Tierra buscando la señal de máxima potencia. Para ello, el sistema contaba con un mapa que daba cuenta de la geometría del *Eagle*, a fin de que la antena no apuntase hacia la estructura de la nave. Sin embargo, el mapa que fue programado a bordo era defectuoso y, como consecuencia, la orientación de la antena también lo fue por momentos. Además, esta situación se vio exacerbada por las interferencias debidas al reflejo de las señales de radio en la superficie lunar, algo que ya se sabía que podría causar algunos problemas en la calidad de las comunicaciones.

Como consecuencia, Aldrin se vio obligado a orientar manualmente la antena de alta ganancia en varias ocasiones, siguiendo su propio criterio o atendiendo a las recomendaciones sugeridas desde Houston. Mientras tanto, en el módulo de mando, Collins hubo de hacer las veces de repetidor en varios momentos, transmitiendo información verbal al *Eagle* cuando lo juzgaba necesario o era requerido desde la Tierra. Después de experimentar los primeros problemas en las comunicaciones, desde Houston se recomendó ejecutar un giro en guiñada de 10 grados para favorecer la línea de visión de la antena con la Tierra. Sin embargo, esta operación no resultó en ninguna mejora apreciable.

Como más tarde recordaría Aldrin, la presencia de estas dificultades en las comunicaciones supuso una distracción constante, debido a la necesidad de añadir una operación manual a las numerosas tareas de vuelo. Además, constituyó una fuente de incertidumbre, ya que en varios momentos la tripulación desconoció si su situación era supervisada desde la Tierra.

Pero los problemas en las comunicaciones también generaron tensión en Houston, pues tan importante era alunizar con éxito como poder reconstruir con fidelidad lo ocurrido en caso de un desenlace fatal. Esto era así hasta el punto de que, si se sucedían los fallos en la transmisión de datos, el director de vuelo en Houston tenía la potestad de abortar el alunizaje si determinaba que no se dispondría de suficiente información para reconstruir un posible accidente.

PROBLEMAS DE NAVEGACIÓN

Desde el inicio de la órbita de descenso hasta 5 minutos después del comienzo del descenso propulsado, el *Eagle* volaba cara abajo; es decir, con las ventanillas orientadas hacia la superficie lunar. Más tarde, todavía en la fase de frenado, se efectuó un giro en guiñada de unos 180 grados para orientar la nave cara arriba. Esto se hizo con el objetivo de que, posteriormente, cuando el *Eagle* comenzase a cabecear durante la fase de aproximación, Armstrong y Aldrin pudieran ver la superficie lunar frente a ellos a medida que descendían (*véase el esquema* «Descenso propulsado»). El propósito de volar cara abajo en la primera parte del descenso fue, entre otras cosas, facilitar que los astronautas pudieran estimar la localización de la nave con respecto a la superficie lunar a medida que avanzaban.

La ventanilla de Armstrong contaba con un dispositivo llamado «indicador del punto de alunizaje», o LPD (*landing point designator*), el cual constaba de dos retículas graduadas, una grabada en el exterior de la ventanilla y otra en el interior. Su objetivo principal era informar del punto estimado de alunizaje durante la fase de aproximación. Cuando la nave ya hubiera cabeceado lo suficiente como para permitir la observación del terreno, la tripulación podría solicitar a la computadora el «ángulo del LPD». Este valor indicaba el punto en las retículas tal que, cuando Armstrong las hiciera coincidir en su línea de visión, la proyección de dicho punto en la superficie lunar indicaría el lugar en el que el sistema haría alunizar la nave en caso de que Armstrong no asumiera el control manual.

Sin embargo, mientras el *Eagle* volaba cara abajo, el LPD se usaba para otros propósitos. Uno de ellos era proporcionar información acerca del alcance horizontal del vuelo. Mediante la comparación de los tiempos en los que se sobrevolaban determinados accidentes del terreno con los tiempos de sobrevuelo recogidos en tablas generadas antes de la misión, Armstrong podía estimar la distancia entre el lugar en el que se alunizaría y el punto planeado si el sistema de guiado no corregía el error.

De esta manera, Armstrong pudo comprobar que «volaban largos tres segundos», un error que el sistema de guiado no acabó corrigiendo y que fue atribuido posteriormente a un problema en la inicialización de la navegación. Este error se podía traducir, y así lo pudieron anticipar los astronautas, en un alunizaje entre 5 y 6 kilómetros más allá del lugar previsto; en una zona menos propicia que la planeada, aunque todavía se encontraba dentro del área que había sido estudiada por los astronautas.

Continúa en la página 28

Los últimos minutos

EDWARD BELL

Aunque coreografiada con minuciosidad, la misión se topó con varios obstáculos durante el descenso final del *Eagle*. Este mapa, reconstruido a partir de imágenes de la sonda de la NASA *Lunar Reconnaisance Orbiter*, muestra la altitud del módulo lunar en los momentos finales del descenso. En ellos Armstrong sobrevoló el punto de alunizaje indicado por el ordenador y buscó un nuevo objetivo sobre la marcha.

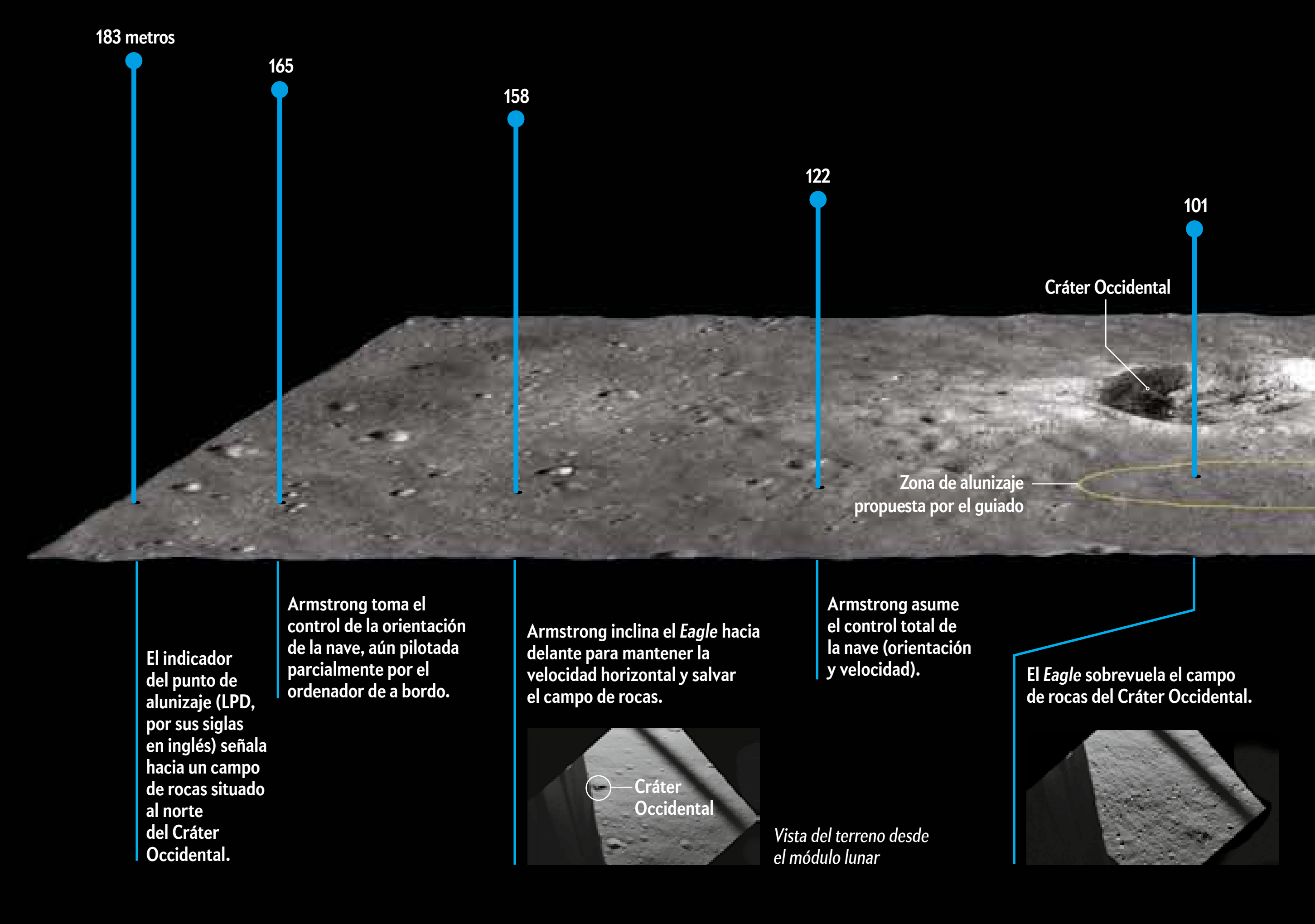
Las complicaciones comenzaron a una altitud de unos 10.000 metros, cuando se activó la alarma etiquetada como 1202 en el panel del *Eagle*. «¿Qué es eso?», preguntó Armstrong a Aldrin mientras la luz parpadeaba y la sirena sonaba a intervalos irregulares. La alarma no había aparecido en ninguna de las simulaciones de vuelo, por lo que los astronautas no la reconocieron. Al final, los controladores en Houston les comunicaron que podían ignorarla, pero intentar determinar su causa les hizo malgastar un tiempo precioso.

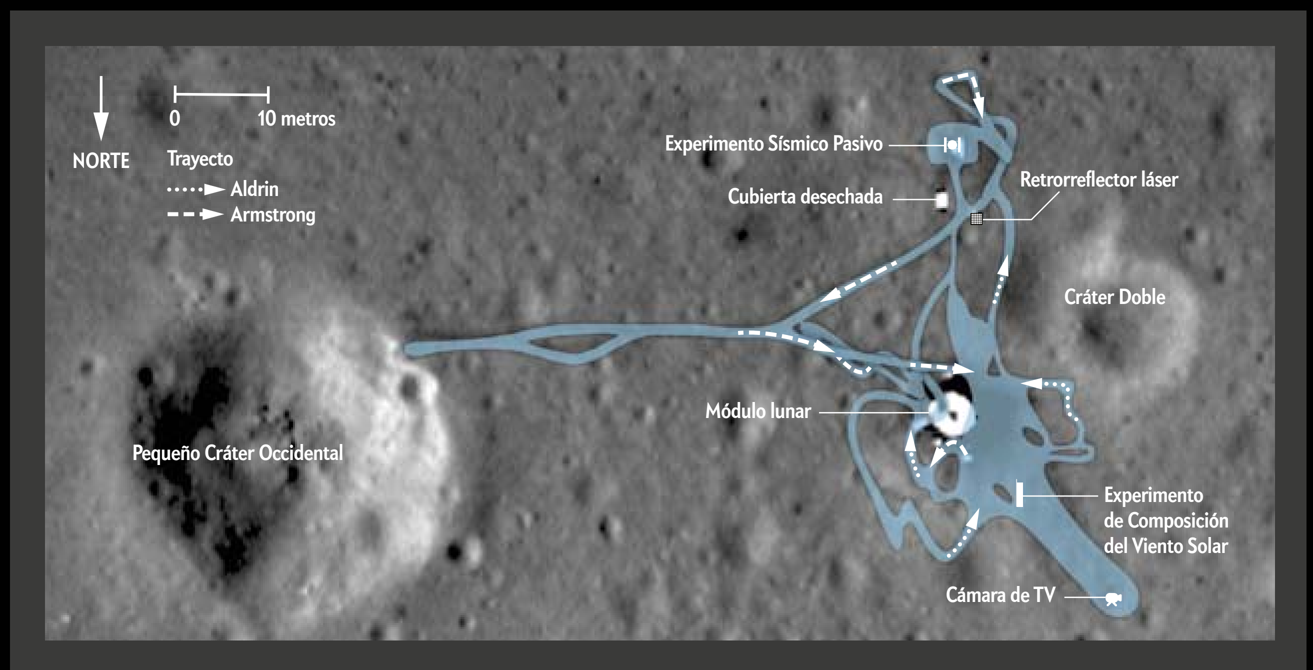
Dado que el combustible se agotaba, cada vez resultaba más difícil maniobrar el *Eagle*. Cuando el nivel de propelente cayó por debajo del 50 por ciento, el líquido comenzó a agitarse con violencia, sacudiendo el vehículo en todas direcciones. Ello provocó que la alarma de nivel de combustible se disparara con una antelación de más de 20 segundos, por lo que los astronautas creyeron disponer de menos tiempo del que en realidad tenían para posarse sin percances.

Finalmente, cuando el *Eagle* se encontraba a una altitud de unos 600 metros, Armstrong miró por la ventanilla para examinar el lugar indicado de alunizaje. (Tenía que haberlo inspeccionado antes, pero, como explicó más tarde en un informe: «Nuestra atención estaba puesta en desactivar las alarmas, mantener el aparato en vuelo y cerciorarnos de que el control era el adecuado para continuar sin tener que abortar la misión. Casi toda nuestra atención se centraba en lo que sucedía en el interior de la cabina».) No le gustó lo que vio. Como describiría después, la zona era «un gran cráter rodeado por un campo de rocas que cubrían un alto porcentaje de la superficie».

Sin combustible ni tiempo, a una altitud de 122 metros Armstrong tomó el control total de la nave, pilotada hasta entonces por el ordenador de a bordo. Justo en el último momento, guio el *Eagle* hasta salvar el campo de rocas y alunizó en un terreno relativamente llano.

Edward Bell *es director artístico en* Scientific American *y animador digital especializado en astronomía.*





LAS HUELLAS DE LOS ASTRONAUTAS

El «pequeño paso para un hombre» de Armstrong se vio seguido por muchos más a medida que él y Aldrin instalaban equipos y exploraban la superficie del satélite. Las imágenes de la sonda *Lunar Reconnaisance Orbiter* muestran el polvo que levantaron los astronautas durante las dos horas y cuarto que permanecieron en la Base de la Tranquilidad. En su mayor parte, los trayectos (*resaltados en la imagen*) se debieron a la instalación de experimentos; entre ellos, uno para detectar pequeños seísmos lunares y otro para medir la composición del viento solar, así como la colocación de un retrorreflector láser que mediría la órbita de la Luna y las variaciones de su distancia a la Tierra. Quien más se alejó del *Eagle* fue Armstrong, que dio una caminata que lo llevó hasta el borde del Pequeño Cráter Occidental, a una distancia de unos 60 metros.

FUENTES: NASA (*Cráter Occidental y campo de rocas*); CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES (*mapa de la base*); THOMAS SCHWAGMEIER Y ERIC M. JONES (*trayecto de los astronautas*); EDWARD BELL (*trayectoria del alunizaje*) Y ELÉONORE DIXON-ROCHE (*camino de los astronautas*)

91 82 76 67 37 30 23

Pequeño Cráter Occidental

Cráter Doble

Armstrong controla la velocidad de descenso del *Eagle* moviendo hacia arriba o hacia abajo el interruptor que la regula. Inclina el vehículo hacia atrás para reducir la velocidad de avance.

1 min. y 50 segundos para el alunizaje.

El radar pierde la señal del suelo, lo que dispara la indicación correspondiente.

En el control de la misión y en la nave se enciende la luz de reserva de combustible, que indica que queda un 5 por ciento de propelente. El control de la misión inicia una cuenta atrás que terminará con el aviso «bingo»: alunizar en 20 segundos o abortar.

Comienza a levantarse polvo del suelo. Quedan 85 segundos para el aviso bingo.

75 segundos para el aviso bingo. Armstrong observa que queda muy poco propelente.

Los gases del motor levantan una cantidad considerable de polvo. 65 segundos para el aviso bingo.

25 segundos para el aviso bingo. Se encienden las luces de contacto; los motores se han detenido. Armstrong radia: «Houston, aquí la Base de la Tranquilidad. El *Eagle* ha alunizado». El control de la misión responde: «Teníais aquí a un montón de gente a punto de ponerse azul. Ya volvemos a respirar. Muchas gracias».


BUZZ ALDRIN junto al *Eagle* en una fotografía tomada por Armstrong. El módulo lunar constaba de dos etapas con motores independientes: la de descenso (*abajo, naranja*) y la de ascenso (*arriba, gris*). En el momento de abandonar la Luna, la etapa superior se desprendió de la inferior, la cual hizo las veces de plataforma de lanzamiento.

NASA/NEIL ARMSTRONG

Viene de la página 25

ALARMAS 1201 Y 1202

Durante las fases de frenado y aproximación, que en total duraron unos 10 minutos, se sucedieron hasta cinco alarmas en la cabina, la última de ellas tan solo 24 segundos antes de que Armstrong asumiera el control manual del *Eagle*. Estas alarmas se produjeron debido a un error en el diseño del sistema eléctrico asociado al «radar de reencuentro», o «de *rendezvous*».

El *Eagle* portaba un radar que debía proporcionar información sobre la navegación relativa al módulo de mando. Su objetivo era que, una vez concluida la exploración lunar, la nave pudiera ascender a su encuentro (*rendezvous* en francés) en la órbita de aparcamiento. El uso de este radar no era necesario durante el descenso propulsado. Sin embargo, era conveniente tenerlo encendido, ya que, en caso de tener que abortar el descenso, los astronautas podrían usarlo para llegar al módulo pilotado por Collins.

El origen de las alarmas pudo encontrarse después del vuelo en el sistema eléctrico que alimentaba tanto a la computadora como al radar. Ambos funcionaban con corriente alterna de igual frecuencia pero que resultó no estar sincronizada en fase, con diferencias aleatorias que dependían del momento en que se encendiesen los distintos sistemas durante el descenso. Como resultado de esas diferencias, cuya existencia y consecuencias eran desconocidas tanto para la tripulación como para los controladores de vuelo en Houston, el radar enviaba interrupciones constantes a la computadora. Tales interrupciones consumían considerables recursos de procesamiento, lo que hacía que el ordenador se saturase y, tal y como estaba programado, emitiese la alarma correspondiente.

Por fortuna, la computadora del *Eagle*, a pesar de tener una capacidad muy inferior a los ordenadores actuales, poseía un diseño de enorme robustez. Estaba concebida para necesitar el 85 por ciento de sus recursos durante el momento de mayor carga de procesamiento, lo que dejaba un margen del 15 por ciento para situaciones imprevistas. Por otra parte, dos características muy innovadoras de su diseño constituían una gran salvaguarda ante contingencias. Por un lado, ejecutaba tareas siguiendo un criterio de prioridades por el que descartaba labores no esenciales en caso de saturación. Por otro, disponía de un sistema de protección de reinicio que le permitía interrumpir tareas, reiniciarse y reanudarlas allí donde habían quedado suspendidas.

Pero el descenso propulsado era la fase que requería mayor capacidad de procesamiento de toda la misión, y las interrupciones que enviaba el sistema eléctrico del radar a la computadora, en combinación con otras tareas, hicieron que esta excediese en ocasiones su 15 por ciento de margen. Ello generó dos alarmas inesperadas, etiquetadas como 1201 y 1202 dependiendo del tipo de registro que se estuviera saturando en la memoria. Su aparición implicó el apagón momentáneo de la interfaz de la tripulación con la computadora y el reinicio de esta cada vez que sucedían. Una vez que Armstrong asumió el control manual del *Eagle*, ya en la fase de alunizaje, las exigencias de procesamiento de la computadora descendieron de forma significativa, lo que explica que no se volviera a producir ninguna de ellas.

La presencia de estas alarmas hasta apenas unos segundos antes de que Armstrong asumiera el control manual del *Eagle* supuso una importante distracción y una fuente de tensión tanto para la tripulación como para el equipo de controladores en Houston, quienes tuvieron la responsabilidad de decidir si continuaban o abortaban la misión cada vez que surgían. En aquel momento, la razón por la que aparecieron era desconocida, así como desconocidas eran las implicaciones que podrían tener más tarde en el vuelo. No había tiempo material para investigar sus causas, ya que las fases de frenado y aproximación eran muy cortas. Pero la nave estaba siendo guiada de forma automática de manera adecuada. Ello invitaba a continuar con el vuelo, ya que, además, llegados a ese punto abortar no era necesariamente más seguro que completar el alunizaje.

ARMSTRONG TOMA LOS MANDOS

El *Eagle* tenía la capacidad de alunizar de forma automática. De hecho, las tres fases del descenso propulsado podían llevarse a cabo de esta manera. Armstrong disponía en todo momento de la opción de tomar el control manual de la nave, pero las fases de frenado y aproximación admitían un margen de error tan pequeño que el pilotaje manual estaba altamente desaconsejado. Sin embargo, la fase de alunizaje sí estaba diseñada para permitir un control humano, pues era concebible que el comandante juzgara necesario maniobrar el *Eagle* en busca de un lugar seguro donde posarlo, a fin de evitar rocas de gran tamaño o zonas del terreno excesivamente inclinadas.

Los datos suministrados por la computadora durante la fase de aproximación indicaban el lugar en el que el programa de guiado posaría la nave de forma automática. Aun así, Armstrong podía cambiar poco a poco ese lugar a través de una palanca cuyos movimientos longitudinales (adelante o atrás) o laterales (izquierda o derecha) implicaban una reasignación de dicho

punto en incrementos fijos del alcance angular longitudinal y lateral de la nave, respectivamente. Sin embargo, a pesar de que se registró una reasignación por parte de Armstrong, esta fue inducida de forma accidental. Por lo demás, llegado el momento del alunizaje, Armstrong desestimó el guiado automático y decidió asumir el control manual debido a varias razones.

La primera se debió a algunos problemas con el LPD, el sistema indicador del punto de alunizaje. Durante la fase de aproximación, Armstrong pudo comprobar que los distintos ángulos del LPD proporcionados por la computadora apuntaban a lugares de alunizaje ligeramente diferentes. Análisis posteriores mostraron que la precisión de dichos ángulos se había visto afectada por el efecto de «chapoteo» (*sloshing*) del combustible y otros líquidos almacenados en los tanques del *Eagle*, lo que afectó a la propia dinámica de la nave. Además, la variación del terreno hacía que la altitud medida por el radar de alunizaje degradase el guiado, lo que también disminuía la precisión de los ángulos del LPD. El efecto acumulado por estos factores era pequeño, pero pocos grados de desviación en los ángulos del LPD suponían una diferencia considerable en la localización del lugar de alunizaje, especialmente si el *Eagle* no se encontraba próximo a ese punto. El problema se resolvió en las siguientes misiones Apolo; sin embargo, el primer alunizaje no pudo beneficiarse del LPD.

Por otro lado, Armstrong también pudo apreciar que el alunizaje se produciría en un área que no ofrecía garantías de seguridad, ya que contaba con numerosas rocas de tamaños diversos. Recordemos que el *Eagle* acabó posándose a unos 6 kilómetros de distancia del punto planeado y en un lugar que, en principio, presentaba peores condiciones que aquel.

Por último, un tercer motivo por el que Armstrong asumió el control del *Eagle* fue más personal: su profesión como piloto de pruebas. Con independencia de la necesidad de proceder o no al control manual, como pilotos de pruebas, ninguno de los comandantes de las misiones Apolo dejó pasar la oportunidad de experimentar personalmente el control del módulo lunar y todos ellos alunizaron de forma manual.

Armstrong asumió el pilotaje total de la nave cuando se encontraba a 122 metros de altitud. Ello le permitió controlar tanto la orientación del *Eagle* como la velocidad de descenso, la cual podía variar mediante un interruptor que la hacía aumentar o disminuir en un pie por segundo cada vez (unos 30 centímetros por segundo, o un kilómetro por hora).

Por debajo de los 60 metros de altitud, el *Eagle* se introducía en un régimen en el que abortar con inmediatez era imposible. El perfil de vuelo en ese momento quedaba determinado por una curva de altitud frente a velocidad a la que llamaban «curva del hombre muerto». Ese nombre se debía a que, si el motor de descenso fallaba entonces, el *Eagle* impactaría contra la Luna antes de que el encendido del motor de ascenso a máxima potencia pudiera contrarrestar la caída.

AMENAZA OCULTA

Desconocido por todos en su día, hubo un problema que estuvo a punto de tener consecuencias fatales: el sistema de control que gestionaba el motor de descenso era marginalmente estable. Aquello era crítico precisamente en la fase de alunizaje, ya que era la que más riesgo corría de exacerbar la estabilidad del motor debido a los continuos ajustes en la orientación de la nave, el empuje del motor y la orientación de su tobera.

El problema fue descubierto después de la misión Apolo 12, cuando se constató la existencia de un error en la documentación que recogía el tiempo de respuesta que transcurría entre la emisión de un comando y la reacción del motor. La documentación reflejaba un tiempo de 0,3 segundos; por tanto, el sistema debía programarse para compensar dicho retraso. Sin embargo, ese tiempo correspondía a diseños antiguos. En el caso del *Eagle*, el tiempo de respuesta se había mejorado hasta los 0,075 segundos.

Por fortuna, el tiempo de compensación se estableció finalmente para un retraso de 0,2 segundos, ya que con ese valor desaparecían las oscilaciones del motor que, antes del vuelo, se habían observado en las simulaciones que reproducían su comportamiento. Aquel cambio de último momento resultó ser una bendición: análisis posteriores a la misión Apolo 12 —que también voló con este problema— demostraron que las consecuencias de compensar el sistema para un retraso de 0,3 segundos habrían sido nefastas, ya que en tal caso el sistema se habría vuelto inestable.

Con una fase de pilotaje manual de 2 minutos y 18 segundos, el vuelo del *Eagle* fue el que finalizó con la menor cantidad de combustible de todas las misiones lunares. La nave se quedó a tan solo 25 segundos del «momento bingo»: una señal de escasez de combustible que significaba que, si no era posible alunizar en los siguientes 20 segundos, era obligado abortar el descenso. Más tarde se comprobó que, en realidad, ese tiempo extra fue de 43 segundos, no de 25, pero nadie pudo beneficiarse de esa información durante el vuelo. De haber tenido que abortar, los 20 segundos de margen a partir del momento bingo tendrían que haberse usado para hacer que el motor de descenso sacase a la nave de la «curva del hombre muerto» en la que se encontraban. Después, los astronautas hubieran tenido que separar la etapa de ascenso del *Eagle* y encender su motor para volar al encuentro con el módulo de mando.

La atención que reclamaron las continuas alarmas en el interior de la nave hizo que Armstrong no pudiera dedicar toda la atención necesaria al exterior durante la fase de aproximación, lo que resultó en una inspección tardía del lugar de alunizaje. Cuando identificó un área satisfactoria para posar el *Eagle*, no estuvo convencido de poder conseguirlo, por lo que decidió sobrevolarla. Más tarde, ya cerca de la superficie, el polvo lunar levantado por el motor dificultó su percepción visual del movimiento del *Eagle*. Además, su orientación le impedía ver la sombra de la nave sobre la superficie lunar, lo que habría supuesto una ayuda visual para estimar la altitud.

La sombra del *Eagle* sí fue visible para Aldrin, cuya verbalización de los parámetros de vuelo fue entonces más relevante que nunca. Finalmente, después de un descenso que Armstrong calificó con una dificultad de «trece sobre diez» debido a todas las complicaciones que surgieron, el comandante acabó posando el *Eagle* sobre la superficie lunar. Un momento que, como piloto de pruebas, destacó como el más importante de la misión; más incluso que aquel en el que imprimió la primera huella de un ser humano en el suelo de otro mundo. IyC

PARA SABER MÁS

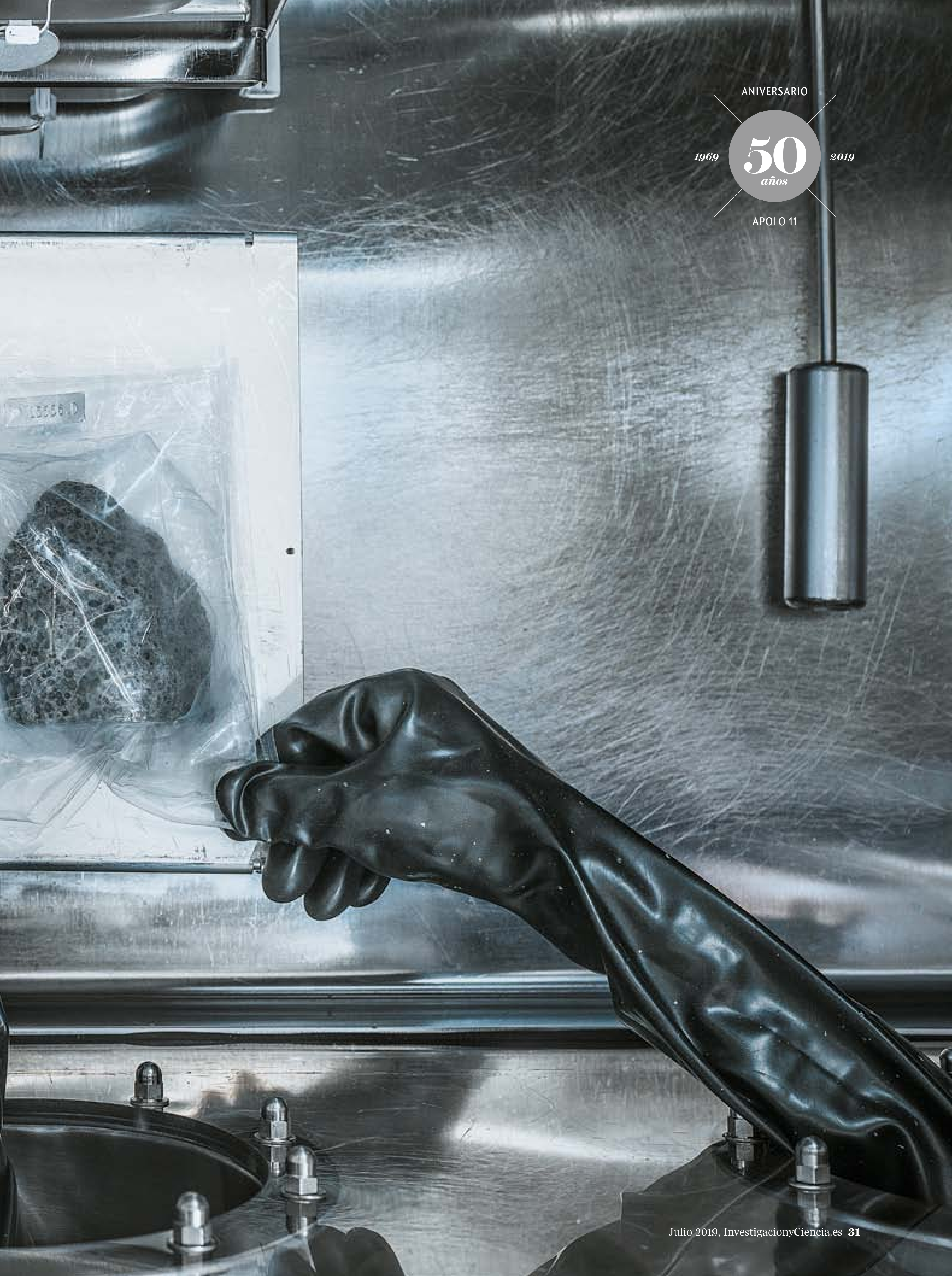
Digital Apollo: Human and machine in spaceflight. David A. Mindell. The MIT Press, 2008.
How Apollo flew to the Moon. David Woods. Springer Praxis, 2008.
Apollo lunar surface journal. Registro de la NASA de las operaciones en superficie llevadas a cabo por los astronautas de las misiones Apolo: **www.hq.nasa.gov/alsj**

LA HERENCIA DEL APOLO

LAS PIEDRAS LUNARES QUE TRAJERON LOS ASTRONAUTAS DE LAS MISIONES APOLO HAN TRANSFORMADO NUESTRA COMPRENSIÓN DE LA LUNA Y DEL SISTEMA SOLAR

Erica Jawin

EL MAYOR FRAGMENTO que se conserva de la roca lunar 15556, obtenida por la misión Apolo 15, se halla en el interior de una bolsa de teflón guardada en una vitrina llena de nitrógeno en la Cámara de Muestras del Apolo, en el Centro Espacial Johnson de la NASA.


ANIVERSARIO
1969
50
años
2019
APOLO 11



Erica Jawin es geóloga e investigadora posdoctoral en el Museo Nacional Smithsoniano de Historia Natural de EE.UU., en Washington.



Las misiones Apolo pasaron a la historia por haber dejado huellas humanas en la Luna. Sin embargo, su mayor contribución a la ciencia estriba en la colección de rocas lunares que los astronautas trajeron consigo. Llamar «tesoro» a estos 382 kilogramos de piedras y regolitos (la gruesa capa de polvo y rocas trituradas que cubre la superficie de la Luna y de otros cuerpos celestes) no les hace justicia. Su estudio ha ayudado a asentar el campo moderno de las ciencias planetarias y ha aportado información clave sobre los procesos geológicos que ocurren en otros cuerpos del sistema solar.

Nací demasiado tarde para presenciar en directo el alunizaje del Apolo 11, pero mi vida y mi carrera científica han sido moldeadas directamente por las rocas recolectadas por las seis misiones tripuladas que llegaron a la Luna. Una de mis inquietudes investigadoras atañe a los depósitos volcánicos de la superficie lunar. Los datos que he usado para mi trabajo proceden en parte de las muestras extraídas por los astronautas de las misiones Apolo 15 y 17, y otros han sido obtenidos por naves en órbita que fue posible construir gracias al conocimiento científico y técnico adquirido durante las misiones Apolo.

Según señala Ryan Zeigler, conservador de las muestras del programa Apolo, en los últimos cincuenta años la NASA ha recibido 3190 solicitudes de fragmentos lunares por parte de más de 500 investigadores principales de más de 15 países. A lo largo de las décadas, la agencia ha distribuido más de 50.000 muestras únicas, y en la actualidad un total de 8000 están siendo examinadas por 145 científicos pertenecientes a ámbitos tan dispares como la astronomía, la biología, la química, la ingeniería, la ciencia de materiales, la medicina y la geología. Pero, por encima de todo, las rocas lunares han revolucionado nuestra comprensión de tres cuestiones fundamentales: la naturaleza de la superficie lunar, el origen de la Luna y la evolución del sistema solar.



SUPERFICIE ANCESTRAL

Antes de que enviáramos naves y seres humanos a la Luna, nuestro conocimiento del satélite natural de la Tierra era en gran medida especulativo, limitado a las observaciones efectuadas desde nuestro planeta. Aquellos estudios habían concluido que la superficie lunar tenía que ser sumamente vieja, ya que se halla saturada de cráteres de impacto que debieron de acumularse durante miles de millones de años. Cuando por fin llegaron las rocas lunares de las misiones Apolo, pudimos confirmar esa sospecha. Los geoquímicos las analizaron en busca de isótopos radiactivos que se desintegran en escalas de tiempo bien conocidas y hallaron que eran mucho más antiguas que la mayoría de las rocas terrestres: sus edades oscilaban entre los 3000 y los 4500 millones de años.

Los científicos planetarios establecieron entonces una conexión que afectaría a casi todos los estudios posteriores sobre la Luna y otros cuerpos planetarios. Compararon las edades de las muestras con el número de cráteres de impacto presentes en la región en que se recogieron. A partir de esa información, desarrollaron un modelo para predecir la rapidez con que se forman cráteres de impacto en la superficie lunar. De este modo, los puntos de origen de las muestras sirven como una especie

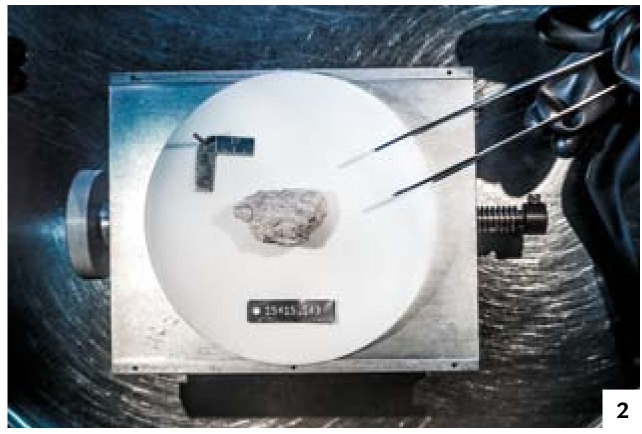
EN SÍNTESIS

Las muestras lunares recogidas por los astronautas de las misiones Apolo marcaron un antes y un después en el desarrollo de las ciencias planetarias.

Los análisis de laboratorio de dichas rocas han permitido esclarecer numerosos aspectos relativos al origen de la Luna y a la evolución del sistema solar.

Aún quedan muestras lunares pendientes de estudiar. De cara al futuro, una nueva colección de rocas extraídas de lugares inexplorados podría aportar mucho más.

FOTOGRAFÍAS DE CHRIS GUNN



CINCO MUESTRAS de las misiones Apolo 15, 16 y 17 (*1*) y la muestra 15415, recogida por el Apolo 15 (*2*). Conocida como «roca del Génesis», esta última ayudó a desarrollar la teoría imperante hoy en día sobre la formación de la Luna.

de piedra de Rosetta, lo que permite a los científicos estimar la edad de cualquier localización de la Luna —e incluso de otros cuerpos planetarios— sin necesidad de visitarlos.

La muestra más antigua tiene unos 4500 millones de años; en esencia, la misma edad que la propia Luna. La mayoría de las rocas de la Tierra son mucho más jóvenes, debido al continuo reciclaje de la corteza causado por la tectónica de placas, un proceso que no existe en nuestro satélite. Por tanto, nos ofrecen un importante atisbo de los primeros días del sistema solar. E incluso nos brindan información sobre la Tierra primitiva. El pasado mes de marzo, el análisis de una brecha (un tipo de roca compuesta por varios fragmentos rocosos soldados entre sí) traída por el Apolo 14 determinó que una de sus partes quizá no se hubiera formado en la Luna, sino que podría tratarse del primer meteorito terrestre: una roca que hace 4000 millones de años salió despedida de la Tierra y aterrizó en la Luna. Miles de millones de años más tarde, el astronauta Alan Shepard, comandante de la misión Apolo 14, la recogió y la trajo de vuelta a casa.

EL ORIGEN DE LA LUNA

Antes de las misiones Apolo, la comunidad científica había propuesto todo tipo de ideas sobre la formación de la Luna. Quizá la Tierra atrajo a algún cuerpo celeste que transitaba demasiado cerca. O tal vez, en sus primeros días, nuestro planeta rotaba tan rápido que una parte se separó de él. O quizá la Tierra y la Luna se crearon al mismo tiempo a partir del disco protoplanetario que dio lugar a todos los planetas del sistema solar. Tras las misiones Apolo, sin embargo, divisamos un panorama completamente distinto.

Hoy por hoy, la teoría dominante sobre el origen de la Luna es la hipótesis del gran impacto. La idea, basada en las pruebas recabadas durante el programa Apolo, postula que hace unos 4500 millones de años un cuerpo del tamaño de Marte, cono-



DOS CONSERVADORES extraen de una cámara de acero inoxidable una muestra obtenida en su día por la misión Apolo 15.

cido como Tea, chocó contra la Tierra primigenia, se rompió en pedazos y arrojó parte de la corteza y el manto terrestre al espacio. Con el tiempo, el material eyectado se acumuló, mezclado con los restos de Tea, y formó un satélite que se enfrió y se convirtió en la Luna.

El modelo se ha visto influido por numerosos análisis de las muestras obtenidas durante las misiones Apolo, así como por los experimentos realizados en superficie. Entre los aspectos más relevantes figuran los siguientes:

HIERRO: La Luna contiene una cantidad sorprendentemente baja de hierro. Los experimentos geofísicos de superficie desplegados por las misiones Apolo revelaron que, en comparación con los planetas rocosos, el núcleo de la Luna comprende una porción muy pequeña de su volumen, correspondiente a tan solo el 25 por ciento de su radio. La relativa escasez de este metal a la que apunta el reducido núcleo de la Luna indica que el centro de la Tierra, rico en hierro, ya se había formado cuando se produjo el impacto gigante.

SEQUEDAD: Las muestras lunares resultaron ser extremadamente secas y carecían casi por completo de sustancias volátiles (elementos o moléculas con bajos puntos de ebullición y que se evaporan con facilidad, como agua, dióxido de carbono, nitrógeno o hidrógeno). Para explicar esta composición, se ha propuesto que las enormes cantidades de energía y calor generadas por el gran impacto eliminaron las sustancias volátiles de los fragmentos de la Luna embrionaria.

OCÉANO DE MAGMA: Una de las hipótesis más influyentes, derivada también de las muestras lunares, plantea que existió un océano de magma en la Luna primitiva. Las muestras del Apolo 11 revelaron que las tierras altas lunares (regiones brillantes y elevadas, a diferencia de las depresiones oscuras que constituyen los mares lunares) presentan altas concentraciones del mineral plagioclasa. La textura de las rocas que contienen dicho mineral sugiere que este se formó a partir de una gran masa de materiales fundidos que se enfrió, y que los cristales de plagioclasa ligeros ascendieron a la capa superior. Dado que las misiones robóticas anteriores habían encontrado rocas similares en otras ubicaciones, y a la vista de la extensión de las tierras altas lunares, la capa de magma debió de haber cubierto la mayor parte, si no la totalidad, de la superficie de la Luna. Dos grupos independientes propusieron la idea de este océano de magma primitivo en 1970, solo seis meses después de que se trajeran las primeras muestras. Diversos indicios geoquímicos y geofísicos respaldan la hipótesis del océano de magma, que aún continúa desarrollándose en la actualidad.

Una circunstancia que complica el modelo del gran impacto son las concentraciones de ciertos isótopos observadas en las muestras obtenidas por las misiones Apolo. En 2001 y 2012, mediante un proceso llamado fluoración láser, sendos trabajos hallaron que las abundancias naturales en la Luna y la Tierra de los isótopos de oxígeno y titanio eran casi idénticas. Pero, si la Luna nació de una colisión entre Tea y la Tierra embrionaria, ¿por qué presenta una firma isotópica tan similar a la terrestre? Esta observación ha inspirado nuevas ideas, como el modelo que describen Simon Lock y Sarah Stewart en «El origen de la Luna» (*pág. 36*).

LA HISTORIA DEL SISTEMA SOLAR

Los estudios de las muestras lunares también han arrojado luz sobre otros cuerpos planetarios. Quizá el resultado más significativo sea el «modelo de Niza» (llamado así en referencia a la ciudad francesa donde se desarrolló) sobre la evolución del sistema solar. Según este, nada más formarse, los planetas gigantes del sistema solar exterior se encontraban más agrupa-

dos. Al cabo de varios cientos de millones de años sus órbitas se volvieron inestables, lo que provocó que Saturno, Urano y Neptuno migraran con rapidez hasta sus órbitas actuales. Este movimiento atrajo materia desde los confines del sistema solar (el cinturón de Kuiper) hacia el interior, donde colisionó con los planetas y sus satélites y generó un caos general que se extendió por todo el sistema solar [*véase* «Nacido del caos», por Konstantin Batygin, Gregory Laughlin y Alessandro Morbidelli; Investigación y Ciencia, julio de 2016].

Si bien este modelo pudiera parecer rebuscado, explica con elegancia una serie de observaciones sin relación aparente sobre nuestro vecindario cósmico. Por ejemplo, al datar las muestras de las misiones Apolo y analizar los cráteres de impacto, los investigadores han podido concluir que el número de meteoritos que se estrellaron contra la Luna alcanzó un pico cataclísmico, conocido como «bombardeo intenso tardío», unos 700 millones de años después de que se formaran los planetas. En un principio no había una explicación sencilla de por qué se habría producido ese incremento brusco en el número de impactos. Sin embargo, el período caótico predicho por el modelo de Niza implica la existencia de una fuente de proyectiles justo en ese momento.

Además de relatarnos la historia del sistema solar, las muestras lunares han permitido investigar la evolución química de las superficies planetarias. La «erosión espacial» es un proceso que describe el desgaste físico y químico al que se ven sometidos los cuerpos carentes de atmósfera. Los análisis del suelo lunar han revelado que este contiene aglutinados, fragmentos minerales y vidrios soldados que se crearon por el impacto de granos microscópicos de polvo. Este material, acumulado a lo largo del tiempo, puede constituir entre un 60 y un 70 por ciento de las muestras de regolito. Asimismo, la erosión espacial también produce diminutas esferas de hierro elemental, denominado hierro nanofase, que se deposita en los bordes de ciertos granos de suelo, lo que provoca que las superficies se oscurezcan con el tiempo. Ahora sabemos que la radiación solar, las grandes fluctuaciones de temperatura y el bombardeo constante de micrometeoritos son algunas de las causas de la erosión espacial.

MUESTRAS PARA EL FUTURO

La ciencia lunar vive días emocionantes. Este año se abrirán nuevas muestras que han permanecido sin estudiar desde que se recogieron en la Luna hace cincuenta años. En el momento en que se entregaron las rocas, la NASA selló y guardó deliberadamente una fracción de ellas a la espera de que la tecnología avanzara más allá de las capacidades de la época. El pasado marzo, el programa Análisis de Nueva Generación de las Muestras del Apolo (ANGSA) seleccionó nueve equipos de investigación que recibirán especímenes sellados al vacío de las misiones Apolo 15, 16 y 17. La oportunidad de estudiar rocas lunares «nuevas» probablemente conducirá a descubrimientos clave sobre la formación y evolución de nuestro satélite natural.

A pesar de lo mucho que hemos aprendido de los experimentos de superficie y de las rocas recogidas durante el programa Apolo, y a pesar de todo lo que sin duda aprenderemos de las que quedan por estudiar, necesitamos más. Aún no hemos examinado nada procedente de la cara oculta de la Luna, de las regiones polares ni del interior profundo del satélite. En particular, me gustaría conseguir material de la cuenca de Aitken, situada en el polo sur y en la cara oculta de la Luna, así como hielo procedente de un cráter polar. La cuenca de Aitken es la mayor estructura de impacto conocida de la Luna (y una de las mayores del sistema solar), y su interior podría contener material de la corteza inferior e incluso del manto. Su estudio también nos ayudaría a comprender la manera en que estas formaciones de tamaño extremo moldean la superficie y el interior de los cuerpos planetarios. Por otro lado, una muestra de hielo polar nos brindaría información sobre la antigüedad y el origen del agua lunar; lo que, a su vez, ayudaría a esclarecer dónde se originó el agua de la Tierra.

Esta lista de deseos podrían satisfacerla las futuras misiones, ya sean humanas o robóticas. Los expertos aún no han alcanzado un consenso sobre cuáles serían más idóneas. Muchos argumentan, con razón, que las misiones robóticas pueden prolongarse durante más tiempo con menores costes y riesgos. Por otro lado, es más probable que los astronautas humanos escojan una variedad más amplia de especímenes inusuales, como refleja la diversidad de la colección de muestras del programa Apolo (rocas, suelos excavados y cribados, virutas de piedras erosionadas, testigos de perforación), así como su volumen y geología (composición, tipo de roca, edad).

Este año se abrirán nuevas muestras que han permanecido sin estudiar desde que se recogieron en la Luna hace cincuenta años

Las misiones Apolo representaron un logro único que alteró fundamentalmente nuestra visión del sistema solar. Cuando celebramos el quincuagésimo aniversario de aquel «gran salto para la humanidad», ninguna otra persona ha pisado otro cuerpo planetario desde que Harrison «Jack» Schmitt y el difunto Gene Cernan, astronautas del Apolo 17, despegaran de la superficie lunar el 14 de diciembre de 1972. Como científica que se ha inspirado en esas misiones, trabajo activamente para crear el «momento Apolo» de mi generación: ver a seres humanos, de todas las etnias y géneros, llegar de nuevo a la superficie lunar, guiados por el ingenio, la perseverancia y el impulso de explorar lo desconocido. IyC

PARA SABER MÁS

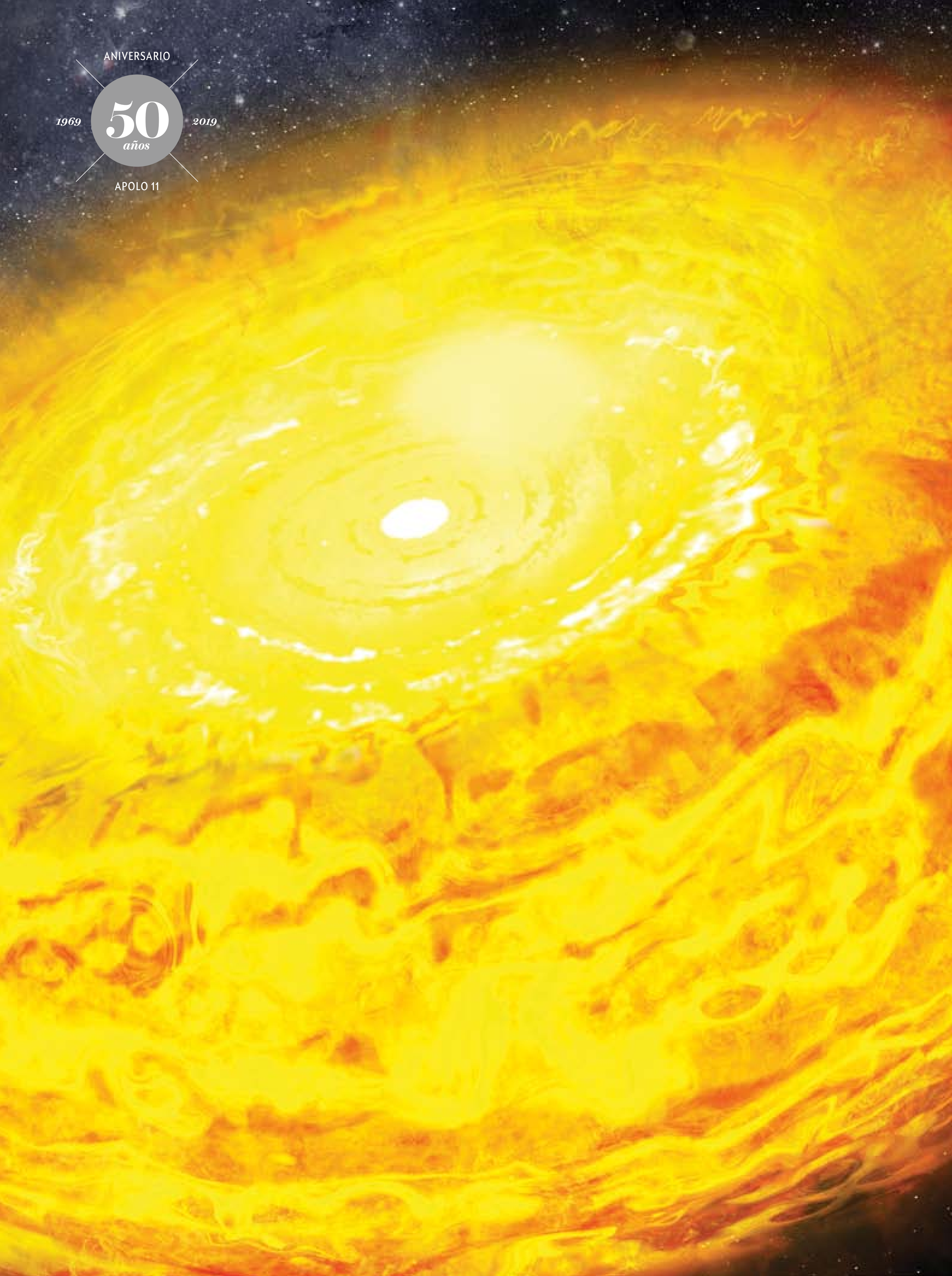
Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. Robin M. Canup en *Science*, vol. 338, págs. 1052–1055, noviembre de 2012.

Apollo Next Generation Sample Analysis Program: **sservi.nasa.gov/articles/apollo-next-generation-sample-analysis-program**

EN NUESTRO ARCHIVO

El legado científico del proyecto Apolo. G. Jeffrey Taylor en *IyC*, septiembre de 1994.

La Luna, una historia llena de sorpresas. Matthieu Laneuville en *IyC*, marzo de 2017.


ANIVERSARIO
1969
50
años
2019
APOLO 11



EL ORIGEN DE LA LUNA

UN NUEVO TIPO DE OBJETO ASTRONÓMICO, UNA SINESTIA, PODRÍA SER LA CLAVE PARA RESOLVER EL PERSISTENTE MISTERIO DE LA GÉNESIS LUNAR

Simon J. Lock y Sarah T. Stewart

Ilustración de Ron Miller



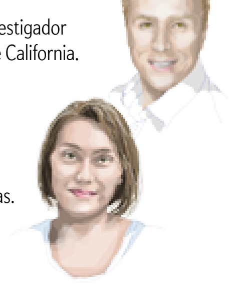
EN SÍNTESIS

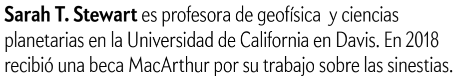
La Luna se formó hace casi 4500 millones de años como resultado de una colisión catastrófica entre la Tierra embrionaria y otro protoplaneta del tamaño de Marte.

La teoría del gran impacto ha dominado el debate científico sobre el origen lunar durante decenios, en parte porque explica el gran tamaño de nuestro satélite y la ausencia de agua en él. Sin embargo, la teoría actual tiene dificultades para justificar otras propiedades de la Luna, como su composición, extrañamente similar a la de la Tierra.

Una sinestia (un híbrido entre planeta y disco, generado en un impacto) es una nueva clase de objeto astronómico propuesto para explicar el nacimiento de la Luna y el hecho de que su composición sea tan similar a la de la Tierra. Las sinestias podrían aparecer de manera habitual en todo el cosmos como resultado del proceso de formación de planetas.

Simon J. Lock es científico planetario e investigador posdoctoral en el Instituto de Tecnología de California.





Sarah T. Stewart es profesora de geofísica y ciencias planetarias en la Universidad de California en Davis. En 2018 recibió una beca MacArthur por su trabajo sobre las sinestias.

El 1 de agosto de 1971, mientras exploraban el borde oriental de la llanura de lava conocida como mar de las Lluvias, en la silenciosa y serena superficie lunar, los astronautas del Apolo 15 David Scott y James Irwin hallaron algo extraordinario: un fragmento de corteza lunar sumamente antiguo, una reliquia de más de 4000 millones de años de edad que contenía pistas sobre la formación de la Luna. En cuanto vio el destello de los primitivos cristales incrustados en lo que más tarde se llamaría «roca del Génesis», Scott comprendió su posible importancia para resolver el misterio del origen de nuestro satélite. «Creo que hemos encontrado lo que veníamos a buscar», comunicó al centro de control mientras Irwin y él recogían la piedra, que se convertiría en una pieza clave del legado científico del programa Apolo.

Los estudios de la roca del Génesis y de los casi 400 kilogramos de muestras que los astronautas del Apolo trajeron consigo a la Tierra dieron un vuelco a nuestra concepción de la historia lunar. Esas valiosas muestras provocaron una suerte de reinicio científico, al invalidar las teorías imperantes (que postulaban que la Luna había sido capturada por la gravedad de la Tierra o que se había formado al mismo tiempo que ella) al tiempo que revelaban importantes detalles nuevos, como el océano de magma que cubrió el satélite recién nacido.

La inmensa energía requerida para generar ese océano de magma apuntaba a una idea nueva y radical sobre el origen de la Luna: que esta se formó a partir de un impacto gigantesco, una colisión entre la proto-Tierra y otro cuerpo planetario. La hipótesis se basaba en cálculos que mostraban que los planetas en fase de crecimiento tienden a chocar entre sí, y en el curioso hecho de que la composición de la Luna guarda un asombroso parecido con la del manto rocoso de la Tierra. Algunos investigadores llegaron a sugerir que dicho impacto habría determinado la rotación de la joven Tierra, estableciendo lo que se convertiría en el ciclo de 24 horas de día y noche de nuestro planeta. La teoría canónica del gran impacto que surgió de estos primeros estudios propone que un choque de refilón con un objeto del tamaño de Marte creó un disco caliente de escombros rocosos alrededor de la Tierra. Más tarde, la fusión de estos fragmentos dio lugar a la Luna, un escenario que explicaría su elevada masa, así como la escasez de agua y de otras sustancias volátiles.

Sin embargo, la hipótesis del gran impacto no está exenta de problemas. El principal de ellos es la sorprendente relación química entre la Tierra y la Luna. Ambos astros están hechos del mismo material, cual gemelos planetarios, mientras que la teoría canónica predice que la Luna debería haberse formado principalmente a partir del cuerpo del tamaño de Marte. La composición de este progenitor tuvo que ser distinta a la de la proto-Tierra, ya que los planetas que se gestaron a partir del disco de gas y polvo que rodeaba al joven Sol habrían incorporado mezclas distintas de los elementos disponibles dependiendo de su posición orbital. Los científicos pueden percibir esas diferencias efectuando mediciones muy precisas de la abundancia relativa de isótopos en las rocas. Ello genera «huellas isotópicas» únicas para cada cuerpo planetario del sistema solar... excepto para la Tierra y la Luna, que, extrañamente, parecen tener huellas casi idénticas.

Esta «crisis isotópica» ha perseguido a la teoría del gran impacto durante décadas. Pero hasta hoy no había surgido ninguna explicación mejor del origen de la Luna. Ahora, sin embargo, en lo que supone otro reinicio científico, hemos descubierto que la mayoría de los impactos gigantes no producen un planeta rodeado de un disco de escombros. De hecho, la mayoría no producen ningún planeta. En cambio, crean una nueva clase de objeto astronómico, un híbrido transitorio entre un planeta y un disco, llamado «sinestia», que explicaría muchas de las características más misteriosas de la Luna.

OCULTAS A PLENA VISTA

El descubrimiento de las sinestias se remonta a hace unos años, cuando los autores de este artículo cavilábamos sobre si el impacto gigante que formó la Luna podía haber establecido la duración del día terrestre. El ciclo diario está relacionado con el impacto a través de una ley fundamental de la física: la conservación del momento angular. En el pasado, la Luna estaba más cerca de la Tierra, así que esta giraba más rápido para conservar el momento angular. De hecho, habría tenido un día de 5 horas. Otros científicos habían descubierto que un gran impacto rasante con un cuerpo celeste del tamaño de Marte podía fijar el momento angular total de la Tierra y la Luna. Pero, si la duración del día terrestre en nuestro planeta respondiera a alguna otra causa, el evento que formó la Luna podría haber tenido más (o menos) momento angular, lo cual abre la puerta a un abanico mucho mayor de posibles colisiones. Y un impacto gigante con más energía y momento angular podría, en casos muy aislados, conducir a una mezcla equitativa de los materiales de los dos

cuerpos que chocan, lo que justificaría la condición de gemelas isotópicas de la Tierra y la Luna.

Examinamos este problema simulando unos cien escenarios distintos para un impacto gigante con grandes cantidades de energía y momento angular, pero los resultados que obtuvimos parecían absurdos. Nuestras representaciones gráficas de todas las posibles consecuencias de la colisión no mostraban la clara división entre «planeta» y «disco» que esperábamos. Tras el impacto, los planetas se calentaban y crecían enormemente, con sus mantos rocosos parcialmente vaporizados e hinchados hasta más de 100 veces el volumen actual de la Tierra, tanto que quedaban conectados al disco circundante. Los objetos resultantes no parecían planetas o discos normales, sino algo intermedio. En un golpe de inspiración, comprendimos que estos enormes impactos habían creado algo nuevo, pero ignorábamos de qué se trataba. Aunque todavía no sabíamos ponerle nombre, habíamos observado nuestra primera sinestia.

Para intentar entender lo que estábamos viendo, retornamos a los principios fundamentales y reexaminamos conceptos básicos como la definición práctica de «planeta». Un planeta se caracteriza en parte por su forma esferoidal (resultado de una autogravedad lo bastante intensa para deformar la roca como si fuera un fluido) y por rotar como un todo, con tan solo pequeñas variaciones debidas a posibles dinámicas internas. Usamos un programa informático de dinámica de fluidos para calcular lo que ocurre en un planeta similar a la Tierra cuando su manto rocoso se calienta poco a poco, y observamos en nuestros modelos el aumento de tamaño del planeta a medida que sus rocas comenzaban a vaporizarse. A las temperaturas extremas que se alcanzan tras un gran impacto, el cuerpo se asemeja a un gigante gaseoso, tan caliente que carece de una superficie real: no es más que una espesa atmósfera de vapor de roca cuya densidad aumenta con la profundidad. Si un mundo así rota con un período de 5 horas, mantiene una forma aproximadamente esferoidal incluso al hincharse como consecuencia del incremento de temperatura.

Pero si el planeta gira aún más rápido, al calentarse sucede algo sorprendente. A medida que se expande, el ecuador alcanza un punto en que rota tan rápido como si estuviera en órbita, lo que se conoce como «límite de corrotación». Un mínimo aporte de calor provoca que la materia comience a fluir al exterior y entre en órbita. De repente, una «aleta» de vapor sobresale del ecuador y el planeta se convierte en algo distinto: ya no es un simple esferoide y tampoco rota cohesionado, sino que presenta una región interna de corrotación y una región externa que gira más despacio. Decidimos bautizar a esta nueva criatura celeste como «sinestia» en honor a Hestia, la diosa griega del fuego del hogar, ya que pensamos que la Tierra fue uno de estos abrasadores objetos. El prefijo *sin-* enfatiza la sinergia entre la materia interconectada del planeta y el disco. Una sinestia es el objeto en que se convierte un planeta cuando el calor y la rotación hacen que pierda su forma esferoidal.

Pronto empezamos a fabricar cientos de sinestias con nuestros modelos informáticos, calentando planetas hasta superar el límite de corrotación. Las sinestias pueden presentar una gran variedad de formas y tamaños en función de cómo se distribuyan en ellas la masa, la energía y el momento angular. Un planeta que se calienta despacio crea una sinestia parecida a un platillo volante, mientras que los impactos gigantes generan enormes sinestias hinchadas con forma de rosquilla o de pastel relleno de crema. Ahora que comprendíamos mejor cómo surgían y se manifestaban estos objetos, empezamos a profundizar en nuestras simulaciones anteriores de impactos gigantes y también hallamos sinestias: llevábamos años produciéndolas por casualidad. De hecho, en los modelos de la mayoría de los científicos que trabajaban en impactos gigantes se escondían sinestias a la espera de ser reconocidas como objetos singulares y nuevos para la ciencia.

Que nadie hubiera reparado en ellas se debía a una cuestión de expectativas equivocadas. Y es que, entre todos los grandes impactos capaces de formar la Luna, las colisiones canónicas con un proyectil del tamaño de Marte no tienen la energía y momento angular suficientes para generar una sinestia. Centrarse en este tipo de choques había llevado a generaciones enteras de científicos a creer erróneamente que lo normal era que un impacto gigante produjera un planeta y un disco.

Para nosotros, el siguiente paso obvio consistía en modelizar la frecuencia con que surgirían sinestias en el complejo proceso de formación planetaria. Desarrollamos técnicas para determinar qué impactos podrían transformar los planetas en sinestias. Al comparar estos resultados con modelos de crecimiento planetario, descubrimos que las sinestias no eran extremadamente raras, sino que en realidad constituían un elemento muy común, aunque transitorio, de los sistemas planetarios jóvenes. De hecho, nuestras simulaciones sugieren que buena parte de los planetas rocosos del universo podrían haberse transformado en sinestias al menos una vez durante su formación. Ahora creemos que la mayoría de los impactos gigantes que dan lugar a un cuerpo con la masa de la Tierra también producirán una sinestia. En un abrir y cerrar de ojos, habíamos descubierto un eslabón perdido en la historia cósmica de los planetas.

DE VUELTA A LA LUNA

Y sin embargo, la pregunta original sigue ahí: ¿podría explicar una sinestia la singular relación que existe entre la Tierra y la Luna? Hemos hallado que la formación de nuestro satélite a partir de una sinestia (un entorno para la acreción lunar muy distinto al de un disco circumplanetario tradicional) ofrece soluciones a muchos de los problemas que aquejaban al modelo canónico del gran impacto.

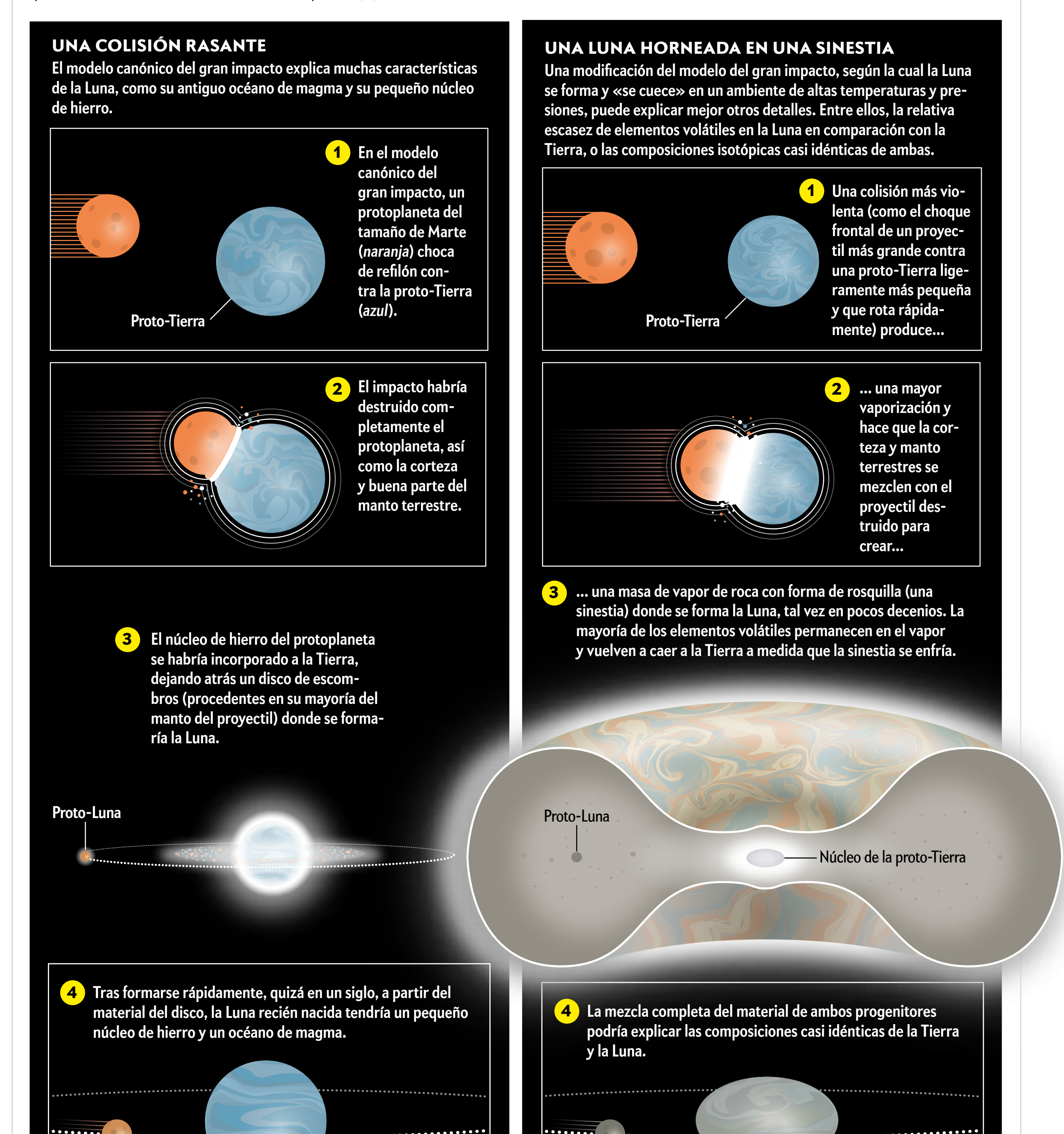
La temperatura superficial de una sinestia viene fijada por el punto de ebullición del material rocoso, que ronda los 2000 grados Celsius en el borde, donde la presión es menor. Allí, al enfriarse por el calor irradiado al espacio, el vapor de roca se habría condensado en gotas de magma que habrían caído al interior de la sinestia. Esta lluvia de magma habría sido diez veces más intensa que la precipitación más fuerte jamás registrada en la Tierra. En este escenario, la Luna habría empezado siendo una pequeña esfera de metal y roca fundidos, parte del material que no se vaporizó en el impacto inicial. Eclipsada por la inmensidad de la sinestia, la Luna incipiente habría orbitado en sus vaporosas y brillantes profundidades, rodeada de ingentes cantidades de roca gaseosa y creciendo con cada gota absorbida de la lluvia de magma. Al enfriarse, la sinestia se encogería y, en unas decenas de años, se contraería tanto que su borde exterior quedaría dentro de la órbita lunar. En ese momento emergería nuestro satélite, nacido de la sinestia agonizante.

Esta historia podría aclarar por qué la Tierra y la Luna son gemelas isotópicas, ya que la sinestia se forma a partir del material vaporizado y bien mezclado de los cuerpos que chocan. Además, las lluvias torrenciales de magma y las turbulencias habrían favorecido aún más la mezcla de material. Si la sinestia hubiera sido lo bastante uniforme, la Luna habría adquirido las mismas relaciones isotópicas que la Tierra.

DOS POSIBLES TIPOS DE IMPACTO

La formación de la Luna

Las pruebas indican claramente que la Luna surgió hace unos 4500 millones de años debido a una colisión entre la proto-Tierra y otro planeta embrionario. Sin embargo, ciertos aspectos, como la relativa escasez de elementos volátiles de la Luna en comparación con la Tierra, encajan mejor con la hipótesis de que nuestro satélite se formó a partir de una sinestia: un objeto transitorio que se produce como consecuencia de un impacto gigante.



JEN CHRISTIANSEN

Una sinestia también resolvería otros misterios lunares que la teoría canónica del gran impacto no consigue explicar. Por ejemplo, aunque la Luna tiene la misma huella isotópica que la Tierra, su composición química no es exactamente la misma: nuestro satélite presenta una menor abundancia de elementos muy volátiles, como el hidrógeno y el nitrógeno, y moderadamente volátiles, como el sodio y el potasio. La hipótesis del gran impacto no justifica de manera convincente estas peculiaridades, que sin embargo surgen de manera natural cuando la Luna en crecimiento «se cuece» a varios miles de grados en el «horno» de una sinestia.

Los elementos más volátiles habrían permanecido preferentemente en el vapor de la sinestia, de modo que en la Luna nunca habrían alcanzado las abundancias que presentan en la Tierra. Al encogerse la sinestia, arrastraría hacia el interior esos elementos, que pasarían a formar parte de nuestro planeta. Con la ayuda de nuestros colaboradores de Harvard Misha Pataev y Stein Jacobsen, demostramos que es posible explicar las abundancias de elementos moderadamente volátiles en la Luna si consideramos que esta alcanzó el equilibrio químico con los elementos vaporizados de la sinestia. Dicho de otro modo: el haber nacido en una sinestia explicaría por qué la Luna tiene una composición similar a la de la Tierra, pero una menor abundancia de elementos volátiles. He aquí nuestra receta para elaborar la química lunar: vaporizar dos cuerpos planetarios que chocan, mezclar bien y cocer a 4000 grados Celsius en un horno de convección entre 10 y 100 años.

Por último, las sinestias también podrían esclarecer algunas misteriosas anomalías de la órbita lunar, que, extrañamente, no está contenida en el mismo plano en que la Tierra orbita alrededor del Sol, el denominado plano de la eclíptica. La órbita de la Luna está inclinada unos 5 grados con respecto a la eclíptica, razón por la que no disfrutamos de eclipses totales de Luna cada mes, sino solo en las raras ocasiones en que los tres astros se alinean. Pero, tras un impacto gigante, si la Luna se hubiera formado a partir de un disco circumplanetario o una sinestia, esperaríamos que orbitase en el plano de la eclíptica. Entonces, ¿por qué está inclinada la órbita lunar?

Un nuevo modelo que describe la evolución de la órbita de la Luna a lo largo del tiempo, desarrollado por el astrónomo del Instituto SETI Matija Ćuk y sus colaboradores, predice tanto la inclinación de la órbita lunar como la duración del día terrestre. El impacto gigante pudo haber «tumbado» la proto-Tierra y producir una sinestia con el eje de rotación próximo al plano de la eclíptica. La Luna se habría formado en el plano del ecuador terrestre y, por tanto, su órbita estaría muy inclinada con respecto a la eclíptica. Con el tiempo, las interacciones resonantes con el Sol habrían enderezado el eje de rotación de la Tierra hasta su inclinación actual de 23 grados (con respecto a la dirección normal al plano de la eclíptica). Eso habría ralentizado el giro de la Tierra y su distancia al Sol habría aumentado ligeramente para conservar el momento angular. A medida que la Luna disipaba su energía orbital provocando mareas en la Tierra, se habría alejado poco a poco del planeta, y la inclinación lunar con respecto a la eclíptica habría ido disminuyendo hasta alcanzar su valor actual. Por tanto, un solo impacto gigante que hubiera creado una sinestia ladeada explicaría muchas de las características dinámicas de la Tierra y su satélite.

En resumen, la elegancia natural y el poder explicativo de la sinestia han salvado la teoría del gran impacto, cambiando para siempre las reglas del juego de los estudios sobre el origen de la Luna.

EL LEGADO DEL PROGRAMA APOLO

Sin los datos de las rocas recogidas por los astronautas de las misiones Apolo, quizá nos hubiéramos conformado con una versión incompleta o incluso errónea de cómo se creó la Luna. El desafío que suponía interpretarlos condujo al descubrimiento de las sinestias. Ahora el reto es seguir avanzando en la comprensión de estos objetos y del papel que desempeñan en la formación de planetas, una empresa que apenas hemos empezado a abordar.

Nuestro modelo de formación lunar a partir de una sinestia puede ponerse a prueba si mejoramos sus predicciones acerca de la composición química e isotópica de la Luna. Aún seguimos aprendiendo de las muestras recogidas en las misiones Apolo, ya que tras medio siglo de avances en instrumentación es posible extraer datos más precisos y detallados. Pero esas muestras constituyen un recurso limitado con enormes lagunas en cuanto a su alcance y completitud. Ahora más que nunca, necesitamos rocas del manto lunar para construir mejores modelos químicos de su composición. Volver a la Luna para obtener muestras del manto, partes del cual deberían estar expuestas en los enormes cráteres de impacto y alrededor de ellos, nos permitirá realizar nuevas predicciones de ese parámetro esencial. Entretanto, las rocas de la Tierra pueden proporcionar otras pistas importantes sobre el origen de la Luna. Recientemente nos hemos percatado de que las regiones más profundas del manto terrestre contienen trazas de materiales que sobrevivieron al impacto gigante del que surgió la Luna. Sea cual sea el proceso que dio lugar a nuestro satélite, no pudo haber borrado los registros químicos. Combinando datos de la Tierra y la Luna, esperamos componer una imagen de la sinestia que creó ambos cuerpos.

La ayuda para comprender las sinestias también podría provenir de más allá del sistema solar. Hasta ahora solo las hemos visto como objetos matemáticos en las pantallas de nuestros ordenadores, pero las sinestias podrían dejar de ser una noción puramente teórica dentro de poco. Muchos telescopios, tanto en el espacio como en la superficie, rastrean el firmamento en busca de siluetas de exoplanetas perfiladas contra las brillantes caras de sus estrellas. Dado que las sinestias presentan formas muy distintas a la de un planeta esférico, proyectarían sombras inusuales en nuestros telescopios. Algunos nuevos instrumentos están obteniendo imágenes de planetas formándose alrededor de estrellas muy jóvenes, los cuales podrían encontrarse aún en la etapa del impacto gigante. Quizá algunas de esas instantáneas revelen una rosquilla hinchada y brillante de vapor de roca allí donde solía haber un planeta. Puede que pronto vislumbremos la primera sinestia natural y presenciemos una repetición de la destrucción creativa que condujo a la formación de nuestro planeta y su luna. IyC

PARA SABER MÁS

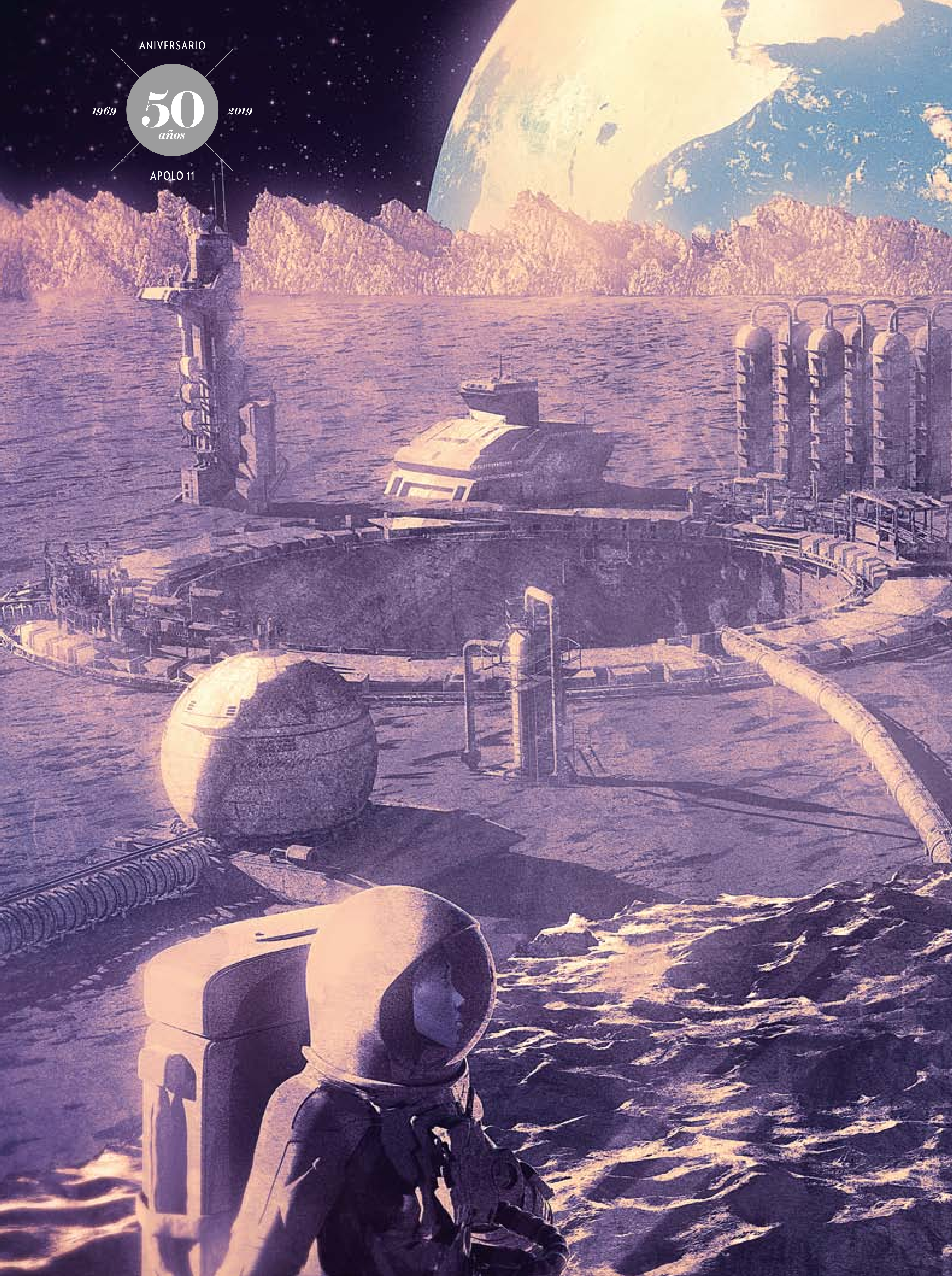
Forming a moon with an Earth-like composition via a giant impact. Robin M. Canup en *Science*, vol. 338, págs. 1052-1055, noviembre de 2012.

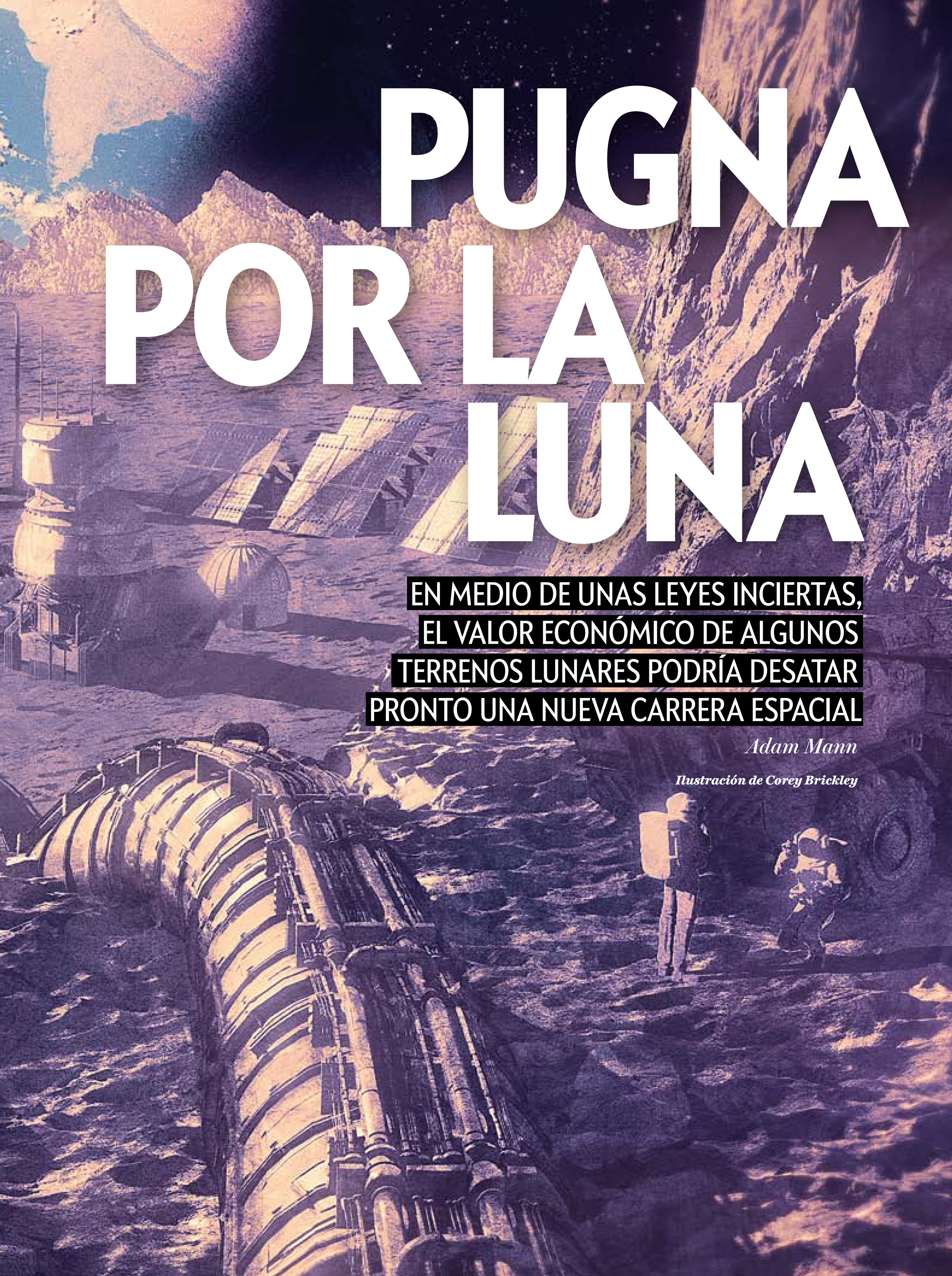
Tidal evolution of the Moon from a high-obliquity, high-angular-momentum Earth. Matija Ćuk et al. en *Nature*, vol. 539, págs. 402-406, noviembre de 2016.

The origin of the Moon within a terrestrial synestia. Simon J. Lock et al. en *JGR Planets*, vol. 123, págs. 910-951, abril de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

La Luna, una historia llena de sorpresas. Matthieu Laneuville en *IyC*, marzo de 2017.


ANIVERSARIO
1969
50
años
2019
APOLO 11



PUGNA POR LA LUNA

EN MEDIO DE UNAS LEYES INCIERTAS, EL VALOR ECONÓMICO DE ALGUNOS TERRENOS LUNARES PODRÍA DESATAR PRONTO UNA NUEVA CARRERA ESPACIAL

Adam Mann

Ilustración de Corey Brickley

Adam Mann es periodista especializado en astronomía y física. Sus trabajos han aparecido en el *Wall Street Journal, National Geographic* y *Wired*, entre otras publicaciones.



Uno de los primeros recuerdos de Bob Richards es una secuencia de imágenes granuladas en blanco y negro: trajes espaciales, un módulo lunar y los astronautas Neil Armstrong y Buzz Aldrin dando sus históricos primeros pasos sobre la Luna. Richards, que a la sazón era un niño pequeño, recuerda estar sentado frente al televisor en el salón de su casa, al norte de Toronto, mientras su padre perdía el tiempo con la antena intentando mejorar la señal. «El Apolo 11 definió un momento clave para la humanidad», afirma el cofundador y director general de Moon Express, una compañía que aspira a comercializar el transporte a nuestro satélite natural y, con el tiempo, extraer materiales de él. «El programa Apolo ha inspirado de forma muy prominente lo que sucede hoy en el espacio.»

En los años sesenta, parecía una cuestión de tiempo que la humanidad se desligase de la Tierra y emprendiese su lenta expansión por el cosmos. Y aunque puede que eso esté tardando más de lo que muchos esperaban, el primer paso podría llegar pronto. Media docena de Gobiernos y varias organizaciones privadas están planeando enviar misiones a la Luna en un futuro cercano: una situación propicia para que surjan conflictos.

El Tratado del Espacio Exterior, que en 1967 firmaron Estados Unidos, el Reino Unido y la Unión Soviética, y del que hoy forman parte 109 países, estipula que la exploración espacial debe conducirse de manera pacífica y en beneficio de todas las naciones. Decreta, además, que nadie puede reclamar para sí la soberanía de un cuerpo celeste. Sin embargo, tiene una laguna: dos «cláusulas de no interferencia», según las cuales se exige a todos los firmantes que eviten causar daños a sondas o asentamientos ajenos; por ejemplo, aterrizando cerca o encima de ellos. Parece una medida razonable, pero abre también un resquicio para que un país o una entidad privada monopolice de facto un lugar muy codiciado simplemente por haber llegado primero.

En el caso de que una nación o una compañía se proclamaran dueños de alguna región o recurso, «podría desencadenarse una "pelea por la Luna" similar en ciertos aspectos a la "pelea por África" que se originó con los recursos minerales del Congo en la década de 1880», escribían en 2016 el astrónomo Martin Elvis, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, y sus coautores en un artículo publicado en la revista *Space Policy*.

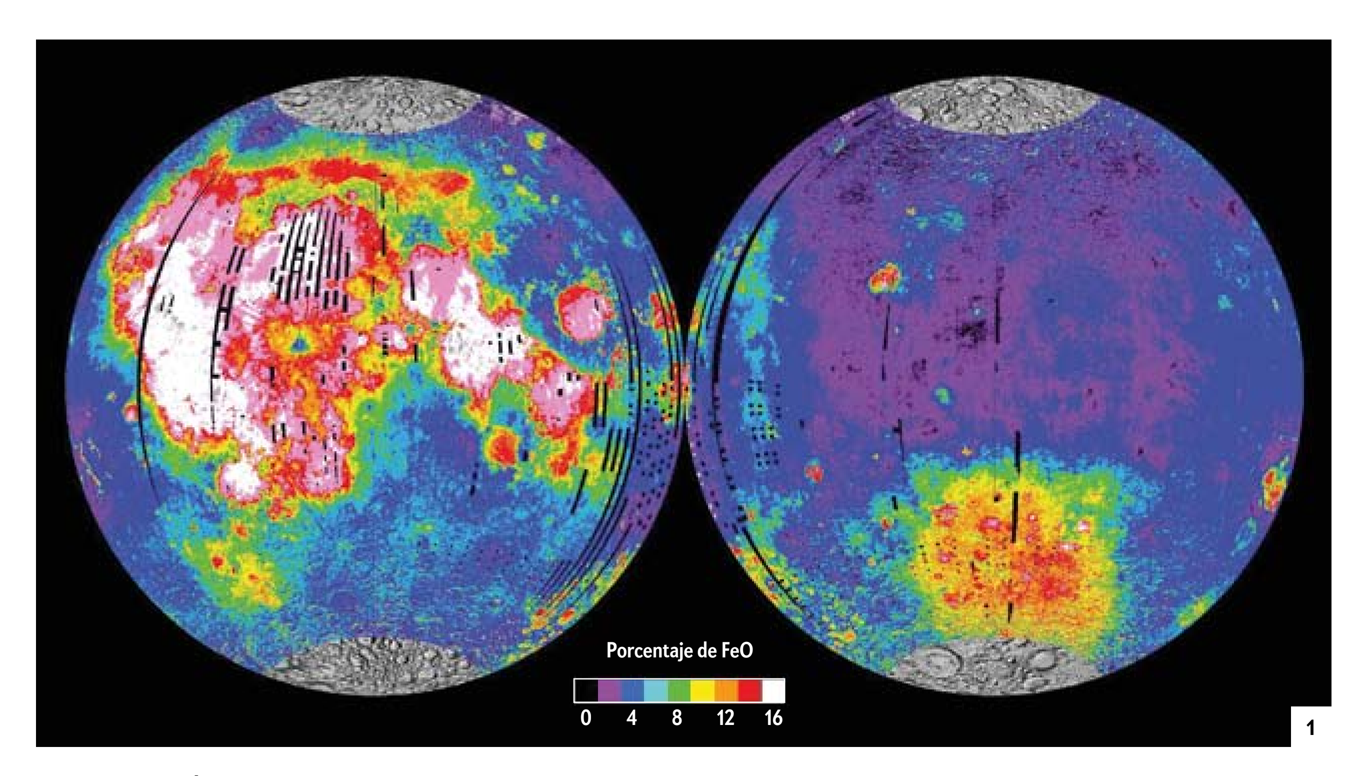
Ahora mismo ya hay planeadas varias misiones que pugnan por un mismo objetivo. La misión india Chandrayaan-2, cuyo lanzamiento está previsto para este mes de julio, se dirigirá a los polos lunares. La Administración Espacial Nacional de China ha anunciado que también enviará a los polos sus próximas tres sondas. Roscosmos, la agencia espacial rusa, está

EN SÍNTESIS

Varios países y compañías privadas están planeando enviar misiones a la Luna durante la próxima década. La extracción de recursos está en la mira de varias iniciativas.

El Tratado del Espacio Exterior, de 1967, impide reclamar la soberanía de un territorio espacial. Sin embargo, incluye también una «cláusula de no interferencia» entre misiones.

Los recursos en la Luna no están uniformemente distribuidos, por lo que ese resquicio legal abre la puerta a una carrera espacial para reclamar los terrenos lunares de mayor valor.





CONCENTRACIÓN DE HIERRO en la Luna según los datos tomados en 1994 por la sonda *Clementine* (*1*). Maqueta de *Blue Moon*, el módulo lunar propuesto por la compañía Blue Origin, de Jeff Bezos (*2*).

desarrollando el programa Luna-Glob, que tocará suelo lunar en las proximidades del cráter de Boguslawsky, cerca del polo sur, quizás en 2021. Y ese mismo año Japón tiene intención de lanzar la sonda SLIM, que será capaz de llevar a cabo alunizajes extremadamente precisos en accidentes geográficos de tamaño muy reducido. Al mismo tiempo, la NASA, la ESA y varias compañías privadas han dirigido también su mirada a la Luna. El pasado mes de mayo, Jeff Bezos, presidente de Amazon y fundador de la empresa de vuelos espaciales Blue Origin, reveló sus planes sobre el módulo lunar *Blue Moon*, que, según anunció, podría estar listo para transportar tripulación dentro de cinco años.

Moon Express aspira a alunizar en el polo sur del satélite en 2021. Y si su nave espacial llega antes que las demás, la empresa quiere que eso sirva de algo. «Una de nuestras motivaciones es ser los primeros», admite Richards. «Y confiamos en que se respeten nuestros derechos de no interferencia», añade.

EL PETRÓLEO DEL ESPACIO

En la Luna no falta terreno por explorar: su superficie total tiene aproximadamente el mismo tamaño que África. Sin embargo, los recursos no se encuentran distribuidos de manera uniforme. El hierro y el titanio, que podrían ser útiles para construir hábitats lunares, abundan en tres regiones concretas. Los depósitos de helio 3, comunes en la capa superior del regolito lunar, podrían usarse como combustible en reactores de fusión. Y los «recursos» no se limitan a los materiales extraíbles. Algunos accidentes geográficos, como ciertos pozos de cráteres, ofrecerían a los astronautas refugio contra la radiación. Y determinadas ubicaciones en la cara oculta de la Luna, inmune a las ondas de radio procedentes de la Tierra, serían ideales para albergar telescopios.

Con todo, a corto plazo el recurso más deseado es el agua. No solo porque cubriría las necesidades de los astronautas, sino porque además cabría descomponerla en sus elementos constituyentes, hidrógeno y oxígeno, a fin de aprovecharla como combustible para cohetes. Con miras a los primeros exploradores extraplanetarios, el agua ha sido bautizada como el «petróleo del espacio».

Algunos de los lugares más prometedores para extraer agua se hallan en los denominados «picos de luz eterna», en los polos norte y sur del satélite. Estas zonas son picos de cráteres: accidentes que a menudo se erigen en los bordes de los cráteres de impacto o cerca de ellos cuando un asteroide choca contra la superficie y arrastra el material hacia un lado, donde se amontona formando crestas. Debido a la mecánica orbital de la Luna,

NASA (1); SAUL LOEB, GETTY IMAGES (2)

el Sol ilumina estas cumbres de manera casi perpetua, lo que proporcionaría una fuente de energía casi ininterrumpida para paneles solares. Los astronautas podrían establecer allí bases para extraer con comodidad el agua localizada cerca al fondo, donde las regiones en sombra permanente han posibilitado la acumulación de hielo.

En cada polo existen cuatro o cinco de estos picos de luz eterna, cada uno de varios cientos de metros de ancho. Dada su relativa escasez, resulta fácil entender por qué las naciones pueden aprovechar el principio de no interferencia para reclamarlos. «Son tan pequeños que nadie más podría alunizar en uno sin arriesgarse a dañar un aparato que ya se encontrara allí», asegura Ian Crawford, científico planetario de la Universidad Birkbeck de Londres y experto en recursos lunares. «Por tanto, las primeras empresas o países que ocupen estos picos, con independencia de las sutilezas legales, disfrutarán de facto de su propiedad.»

LAGUNAS LEGALES

En esencia, el Tratado del Espacio Exterior fue redactado hace medio siglo por los dos únicos países que por entonces podían soñar con viajar a la Luna: EE.UU. y la Unión Soviética. Los juristas llevan debatiendo desde entonces las implicaciones del documento. Pero varios acontecimientos recientes, como el auge de los vuelos comerciales al espacio, han suscitado cuestiones que en aquella época nadie contemplaba.

En 2015, el Congreso de EE.UU. desató la polémica al aprobar la Ley de Competitividad Comercial de los Lanzamientos Espaciales. Esta especificaba que, aunque nadie pudiese reclamar la propiedad de un cuerpo celeste, todo material obtenido pertenecería legalmente a la entidad que efectuase la extracción, que, por consiguiente, podría comerciar con él. En marzo de 2017, representantes de Rusia y Brasil elevaron una protesta ante el Comité de las Naciones Unidas para el Uso Pacífico del Espacio Exterior (COPUOS), alegando que la minería extraterrestre constituía una clase de apropiación de facto y que se necesitaba un consorcio global para regular las operaciones de extracción.

Otros países —entre los que figura Luxemburgo, que aspira a convertirse en un actor importante en la explotación de los recursos espaciales— apoyan a EE.UU. en su interpretación más liberal de la ley. Por su parte, los delegados chinos de COPUOS parecen estar en una posición intermedia, al menos hasta comprobar qué lectura prevalecerá. «La ley internacional la elaboran los Estados colectivamente», explica Frans von der Dunk, profesor de la Universidad de Nebraska-Lincoln especializado en derecho espacial. «Pero si uno de ellos afirma que algo es legal y otro exige una regulación internacional, entonces estallará un problema serio.»

Tal y como están hoy las cosas, es muy probable que las regiones más codiciadas se adjudiquen por orden de llegada, lo que solo beneficiará a aquellas naciones y empresas ricas y con capacidad para alcanzar pronto tales objetivos. Y ello podría aumentar la animosidad de los países menos prósperos hacia quienes reclamen derechos de apropiación; una situación de tensión creciente muy similar al conflicto actual en el mar del Sur de China, observa Crawford. Por el momento, no hay medios para asegurar que las zonas de interés científico vayan a conservarse intactas. Anthony Milligan, especialista en ética del King's College de Londres y coautor de Elvis en el artículo de *Space Policy*, aboga por afrontar tales enigmas antes de que la explotación de los recursos lunares haya comenzado en serio. «Una vez que la presencia en la Luna se vuelva habitual, la ley empezará a verse muy diferente y sus colosales lagunas quedarán de repente en evidencia.»

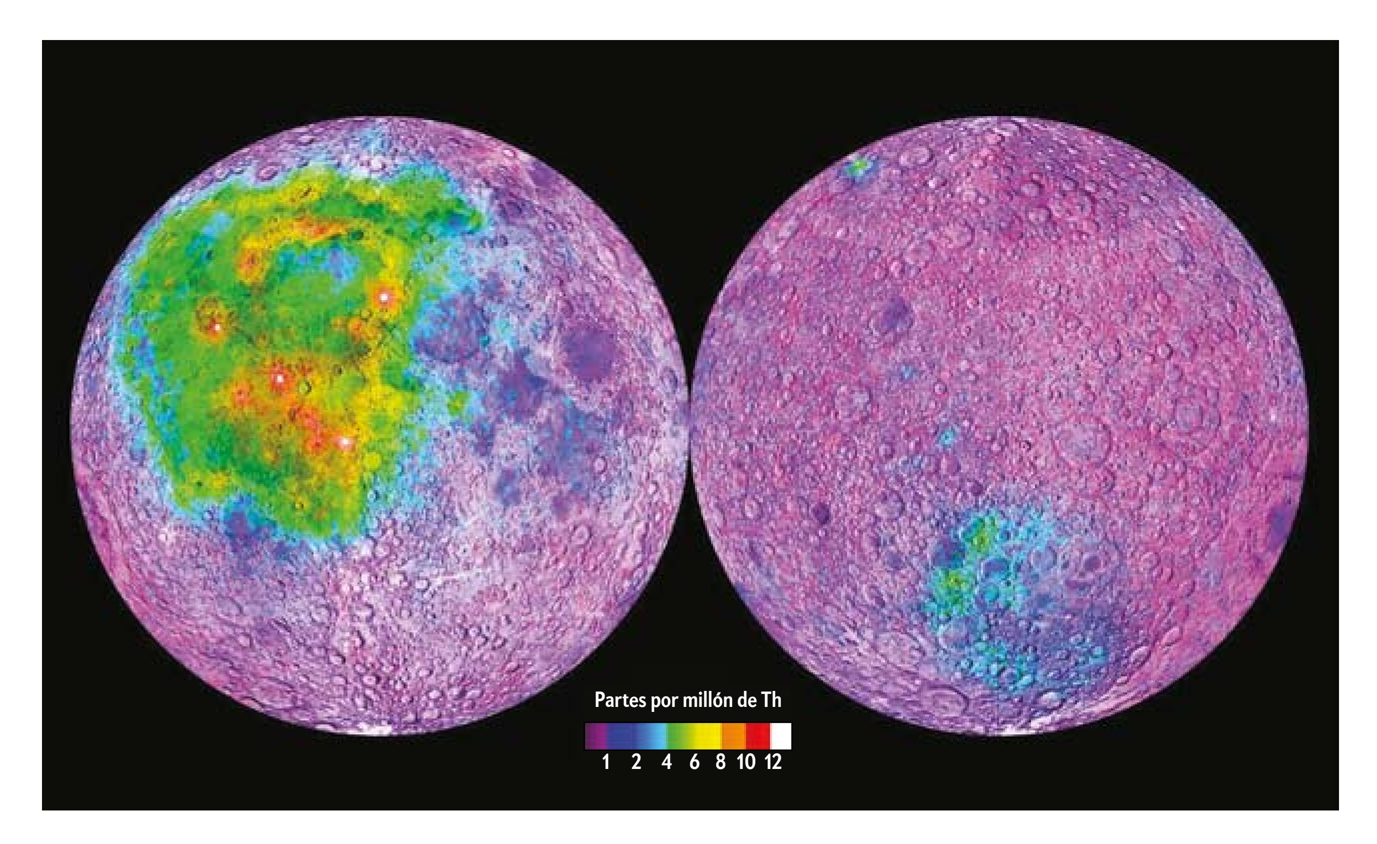
En esencia, el Tratado del Espacio Exterior fue redactado hace medio siglo por los dos únicos países que por entonces podían soñar con viajar a la Luna: EE.UU. y la URSS

Para muchos, el programa espacial chino, dotado de voluntad política y poderío tecnológico, parece haber tomado ventaja. Los ingenieros del gigante asiático han dejado entrever que son capaces de colocar un aparato en la superficie de la Luna con una precisión de centímetros. La próxima serie de misiones Chang'e tendrán como objetivo recoger muestras e inspeccionar en detalle los polos. En opinión de Von der Dunk, a los demás países les convendría empezar a establecer normas que frenaran las posibles rivalidades, por más que ello implique renunciar a parte de su autonomía.

Algunos grupos ya se afanan en ello. Hace unos años, Tanja Masson-Zwaan, experta en derecho espacial de la Universidad de Leiden, cofundó el Grupo de Trabajo de La Haya para la Gobernanza Internacional de los Recursos Espaciales, una organización que ha reunido a Gobiernos, industria y mundo académico con el fin de elaborar recomendaciones sobre minería extraterrestre. En 2017 puso los cimientos para construir un marco legal que aspira a equilibrar los intereses de los distintos participantes de acuerdo a las leyes internacionales. Para la minería lunar, Masson-Zwaan sugiere la creación de un organismo similar a la Unión Internacional de Telecomunicaciones, una agencia de las Naciones Unidas encargada de asignar y repartir las órbitas de los satélites y el uso de las distintas radiofrecuencias.

RIESGOS Y RECOMPENSAS

Si bien existen numerosos planes en marcha para ocupar la superficie lunar, la extracción de recursos y su traslado a la Tierra constituye un objetivo a largo plazo. Algunos incluso lo calificarían de quimera. Dados los increíbles costes y obstáculos tecnológicos que plantea no ya alunizar, sino el mero hecho de ir al espacio, resulta difícil imaginar que el transporte de



CONCENTRACIÓN DE TORIO en el suelo lunar según los datos de la sonda *Lunar Prospector*, de la NASA. Este metal se ha propuesto como combustible alternativo para reactores nucleares.

NASA

materiales a la Tierra vaya a ser rentable en un futuro próximo. Deep Space Industries y Planetary Resources, dos compañías fundadas en los albores del siglo XXI y que pretendían dedicarse a la minería de asteroides, no consiguieron atraer a suficientes inversores y acabaron adquiridas por un fabricante de satélites y una empresa de criptomonedas, respectivamente. «Es muy distinto a los días de la fiebre del oro, en la que cualquier persona con una mula o un pico podía tratar de encontrar oro», observa George Sowers, experto en recursos espaciales de la Escuela de Minas de Colorado.

Aun así, los expertos opinan que, si las actividades económicas en el espacio despegan, la minería no se quedará a la zaga. Elvis señala a los constructores privados de cohetes, como la compañía de Elon Musk SpaceX, la cual está reduciendo el coste de poner vehículos en órbita. Cuanto más barato y sencillo sea ir al espacio, más habituales serán las misiones. La demanda de combustible y otros recursos crecería, y transportar materiales desde la Luna, donde la gravedad es relativamente baja, resultaría más rentable que hacerlo desde el profundo pozo gravitatorio de nuestro planeta.

Richards aspira a desempeñar un papel en la integración de la Luna en la esfera económica de la Tierra. Hasta ahora, sin embargo, también él ha sufrido dificultades para abandonar el planeta. Cuando cofundó Moon Express, en 2010, su empresa formó uno de los 16 equipos que compitieron por el premio Google Lunar XPRIZE, un reto planteado en 2007 para incentivar la construcción privada de una nave espacial robótica capaz de llegar a la Luna, desplazarse sobre su superficie y transmitir imágenes y datos. La fecha límite original de 2012 se prolongó varias veces, pero en enero de 2018 la Fundación XPRIZE admitió que nadie conseguiría hacerse con los 30 millones de dólares del premio.

Moon Express planea poner su primer vehículo en órbita lunar en 2020. Sin embargo, está por ver si su modelo de negocio, consistente en ofrecer a agencias espaciales y empresas privadas transportes de carga útil a la Luna, será viable a largo plazo. Cuando se le pregunta si percibe algún conflicto entre su deseo de reclamar la propiedad de un recurso y la necesidad de hallar una solución equitativa para todas las partes, Richards adopta una postura filosófica. Sostiene que las tensiones que emanan del Tratado del Espacio Exterior reflejan las que existían entre los sistemas de creencias de los dos países que lo redactaron. Los soviéticos contemplaban el mundo desde una perspectiva colectivista según la cual los bienes debían distribuirse por igual, mientras que los estadounidenses creían en una mayor libertad personal y en un sector privado sin restricciones. «Esa es la razón por la que el tratado está abierto a interpretación», concluye. «Creo que, como especie, ahora tenemos una oportunidad de conquistar esta nueva frontera sin tener que conquistarnos unos a otros.» IyC

PARA SABER MÁS

Tratado del Espacio Exterior: **https://2009-2017.state.gov/t/isn/5181.htm**

EN NUESTRO ARCHIVO

Aerolíneas espaciales. David. H. Freedman en *IyC*, febrero de 2011.
Destino: la Luna. Michael Belfiore en *IyC*, junio de 2012.
Investigación espacial de bajo coste. Alan Stern en *IyC*, junio de 2013.



TODO EL MUNDO ES BIENVENIDO

ENTREVISTA CON JOHANN-DIETRICH WÖRNER, DIRECTOR GENERAL DE LA AGENCIA ESPACIAL EUROPEA, SOBRE EL PROYECTO DE LA ALDEA LUNAR

Clara Moskowitz



JOHANN-DIETRICH WÖRNER, director general de la ESA.

Sin la Guerra Fría, la misión Apolo 11 jamás habría tenido lugar. La necesidad de derrotar a la URSS y de proclamar la superioridad tecnológica de EE.UU. hizo que, en 1966, en el apogeo de la carrera espacial, la NASA se llevase el 4,5 por ciento del presupuesto nacional estadounidense. Sin embargo, después del primer alunizaje, la agencia nunca volvió a recibir más del 2 por ciento, una cantidad que desde 2010 se ha visto reducida al 0,5 por ciento anual.

Hoy, el prestigio nacional no es un incentivo suficiente para que un país acometa por sí solo la exploración del espacio. Si la humanidad quiere volver a viajar a otro cuerpo planetario, tendrá que hacerlo unida. Quien quizás haya expresado esta idea con mayor vehemencia es Johann-Dietrich Wörner, el director general de la Agencia Espacial Europea (ESA). En 2015, Wörner presentó su idea de la «Aldea Lunar»: una especie de campamento universal en la superficie del satélite en el que cualquier país, empresa, universidad, organización sin ánimo de lucro o individuo estaría invitado a participar, ya fuera enviando personas, robots o emprendiendo acti-



LA ALDEA LUNAR aspira a albergar actividades científicas y comerciales de múltiples países y empresas.

MATTHEW STAYER, GETTY IMAGES (*Wörner*); P. CARRIL, AGENCIA ESPACIAL EUROPEA (*ilustración*)

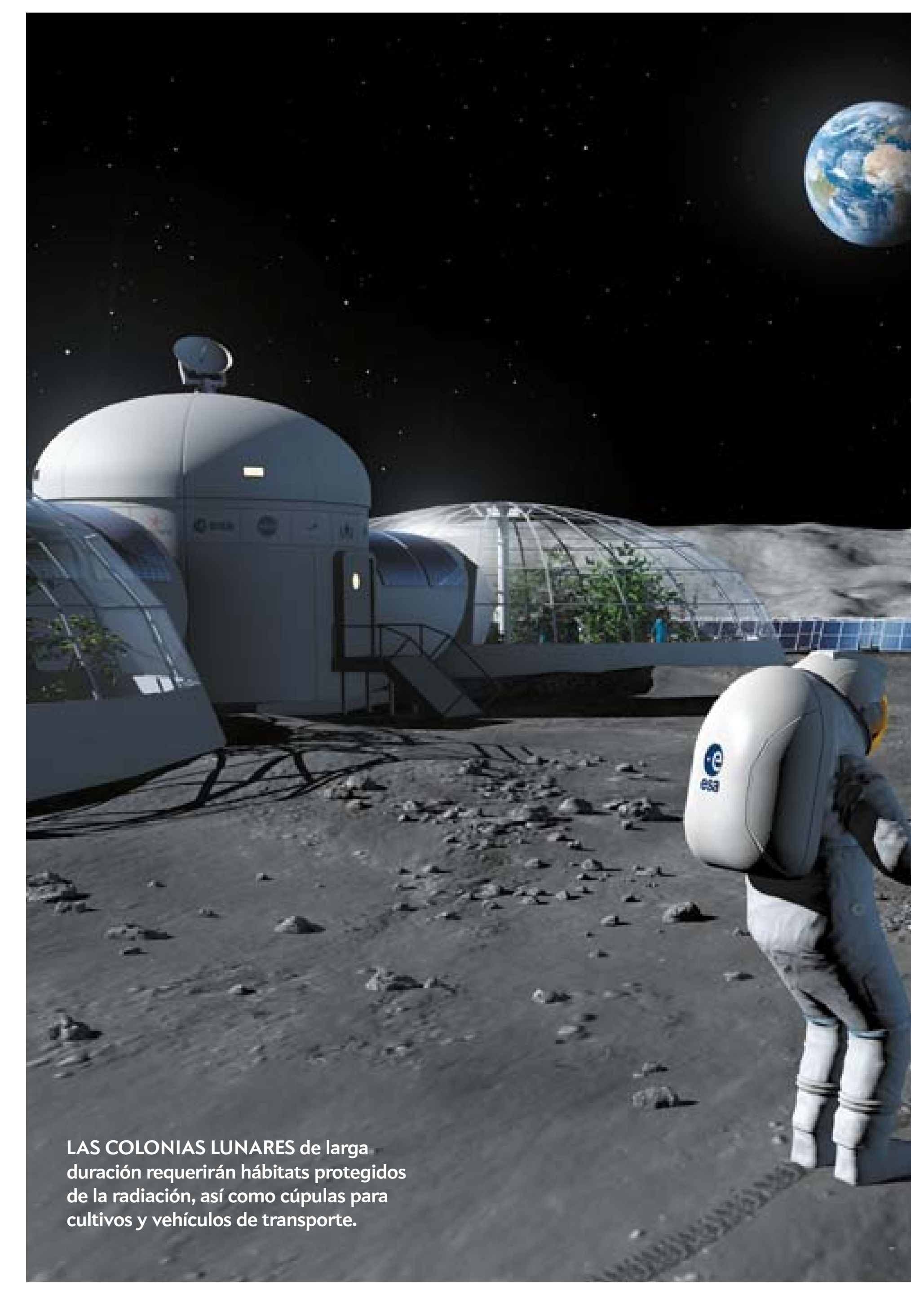


vidades comerciales. Para demostrar su buena fe internacional y colaborativa, el proyecto no está coordinado por la ESA, sino por una organización no gubernamental con sede en Viena llamada Asociación de la Aldea Lunar, abierta a la adhesión de nuevos grupos e individuos. En esta entrevista, Wörner habla sobre los objetivos del proyecto, sobre el debate entre la Luna o Marte y sobre por qué ahora es el momento idóneo para ir.

Hábleme de sus planes para volver a la Luna.
No queremos *volver* a la Luna.

¿A qué se refiere?
Queremos *avanzar* hacia la Luna. Es distinto. No queremos una carrera espacial por cuestiones de prestigio. La Luna es el lugar perfecto para colaborar de verdad a escala global. En el pasado, las actividades espaciales se llevaron a cabo de manera directa por parte de las agencias, como las misiones del programa Apolo. Ahora estamos desarrollando proyectos similares en la ESA. Pero también tenemos otros en los que actuamos como intermediarios, propiciadores o facilitadores. En eso consiste la Aldea Lunar.

La Aldea Lunar es un concepto abierto y multicolaborativo. Todas las palabras de esta frase son importantes. Con «multicolaborativo» me refiero a que pueden adherirse tantos socios como quieran. «Abierto» significa que no existe ningún requisito especial para formar parte de él. Y se trata de un «concepto», no de un único proyecto. Los distintos socios deberían definir qué desean aportar, ya sea transporte, minería, turismo, ciencia o desarrollo de tecnología para uso de recursos in situ, como emplear el agua del satélite para producir combustible. Está totalmente abierto a todo tipo de propósitos.



LAS COLONIAS LUNARES de larga duración requerirán hábitats protegidos de la radiación, así como cúpulas para cultivos y vehículos de transporte.

P. CARRIL, AGENCIA ESPACIAL EUROPEA

¿Considera que la Aldea Lunar forma parte del legado del Apolo o es un intento deliberado de apartarse?
El programa Apolo se desarrolló en un ambiente muy distinto. Lo que lo impulsó en aquel entones fue la competición. El proyecto actual, en cambio, creo que lo propicia la cooperación. Pero, desde luego, es posible que sin el Apolo ni siquiera nos lo hubiéramos planteado.

¿Vio el alunizaje del Apolo 11? ¿Cómo influyó en usted?
Sí. Tenía 15 años. En Alemania era de noche y no dormí nada. Me acuerdo muy bien: estaba plantado ante el televisor y vi los primeros pasos de Neil Armstrong y Buzz Aldrin. Cuando terminó la transmisión, salí de casa a tomar el aire, me quedé respirando hondo y pensando: «Estamos forjando el futuro». Para mí fue un gran día. En aquel momento nunca habría imaginado que participaría en actividades espaciales. Y ahora soy el director general de la ESA.

¿Por qué se han fijado como objetivo la Luna y no otros destinos nuevos, como Marte?
También soy partidario de ir a Marte. Pero creo que el camino que debemos seguir pasa primero por la Luna. Hoy por hoy no podemos hablar de misiones tripuladas a Marte debido a los peligros de la radiación y otros problemas. ¿Nos atreveríamos a embarcar a seres humanos en un viaje de dos años, en un entorno en el que es di-



«Confío en que no ocurra como durante la conquista del Oeste, cuando cada cual reclamaba la propiedad del terreno que ocupaba. Espero que no levantemos vallas en la superficie de la Luna»

fácil sobrevivir y en el que, si contrajeran alguna enfermedad, no tendríamos medios para hacerlos regresar? Aún hemos de perfeccionar la tecnología.

La Luna constituye un buen banco de pruebas para desarrollar la tecnología. Por ejemplo, podemos aprovechar los recursos de la superficie lunar para construir estructuras que den refugio a los astronautas, para erigir observatorios y para producir combustibles de hidrógeno y oxígeno. Así pues, la Luna es un trampolín para llegar más lejos: a Marte. Pero eso no ocurrirá en un futuro cercano, aún faltan décadas. Y aunque algunos estén anunciando metas a corto plazo, veremos que no es posible.

Han pasado 50 años desde el programa Apolo. ¿Por qué no hemos vuelto a enviar astronautas? ¿Por qué cree que ahora es el momento adecuado?

Veo mundialmente la disposición de trabajar juntos. He mantenido conversaciones con chinos, estadounidenses, japoneses y rusos, y todos ellos están dispuestos a colaborar en la exploración de la Luna, Marte y más allá.

Confío en que no ocurra como durante la conquista del Oeste, cuando cada cual reclamaba la propiedad del terreno que ocupaba. Espero que no levantemos vallas en la superficie de la Luna. En Alemania tenemos experiencia con vallas y muros. Espero que esta vez lo hagamos mucho mejor.

¿Cuál cree que es el mayor obstáculo para la Aldea Lunar?

Cierto tipo de papel que cabe en una mano y que en una de sus caras creo que tiene un retrato de George Washington [*ríe*]. El dinero.

Si la Aldea Lunar comenzara hoy, ¿se embarcaría en el viaje?

Tengo una cita para cenar, pero la cancelaría si alguien me propusiera ir ya mismo. Sí, llamaría a mi familia y me iría sin dudarlo. Soy una persona curiosa, es esa curiosidad la que me movería a hacerlo. Pero solo iría con un billete de vuelta. IyC

PARA SABER MÁS

Web de la Asociación de la Aldea Lunar: **moonvillageassociation.org**

EN NUESTRO ARCHIVO

La importancia de regresar a la Luna. Clive R. Neal en *IyC*, septiembre de 2016.

por Ignacio de la Riva y Carles Vilà

Anfibios de los Andes

La variedad de hábitats ha favorecido la enorme diversificación del grupo en la cordillera

En todo el mundo se han descrito unas 8000 especies de anfibios, entre las que se incluyen ranas, salamandras y cecilias (anfibios sin patas y forma de serpiente). Un tercio de ellas habitan en las regiones tropicales de América Central y del Sur. Los mecanismos que han llevado a esta concentración de bioversidad en los trópicos americanos son poco conocidos. Sin embargo, está muy claro que la fragmentación natural de los hábitats favorece la diversificación en los organismos que presentan una baja capacidad de dispersión, como es el caso de los anfibios.

La orogenia que llevó a la formación de los Andes ha facilitado la aparición de nuevas especies. Los gradientes altitudinales originan hábitats muy diferentes en cortas distancias. A lo largo de pocos kilómetros de ascensión por las laderas orientales puede pasarse de zonas semidesérticas y selvas tropicales a bosques montanos húmedos, bosques de nubes con helechos arborescentes y páramos áridos o húmedos situados a más de 4000 metros de altura.

Además, los obstáculos geográficos, como los ríos, las altas montañas, los valles profundos y las zonas áridas, provocan la fragmentación de estos hábitats. Como consecuencia de ello, algunas poblaciones de anfibios quedan aisladas y se adaptan a las condiciones locales, lo que da lugar a una gran diversidad de especies. Así, mientras las especies de tierras bajas pueden distribuirse en extensas áreas geográficas de la cuenca amazónica, muchas especies de alta montaña presentan distribuciones restringidas. Algunas incluso viven en un único valle y están adaptadas a sus condiciones climáticas particulares.

Sin embargo, a pesar del aparente aislamiento de esas poblaciones de anfibios, las infecciones por patógenos (principalmente, la quitridiomicosis) y las alteraciones ambientales están amenazando a muchas especies, algunas de las cuales ni siquiera se han llegado a clasificar. Nuestros estudios llevan años documentando la diversidad de anfibios andinos, así como los patrones o esquemas generales que la rigen y los procesos que la han generado.

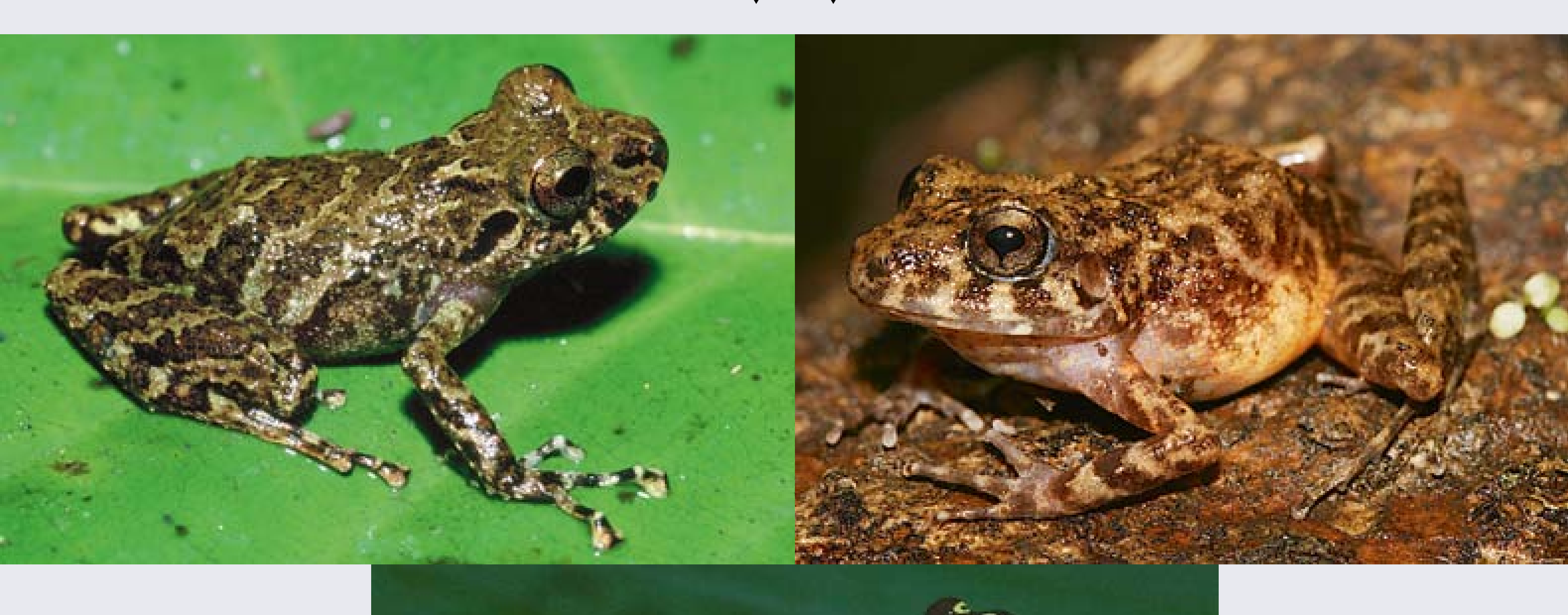
—Ignacio de la Riva
Museo Nacional de Ciencias Naturales, del CSIC.
—Carles Vilà
Estación Biológica de Doñana, del CSIC.



IGNACIO DE LA RIVA

PRISTIMANTIS: La mayoría de las más de 500 especies de este género viven en los bosques andinos. En la imagen, *P. platidactylus*.

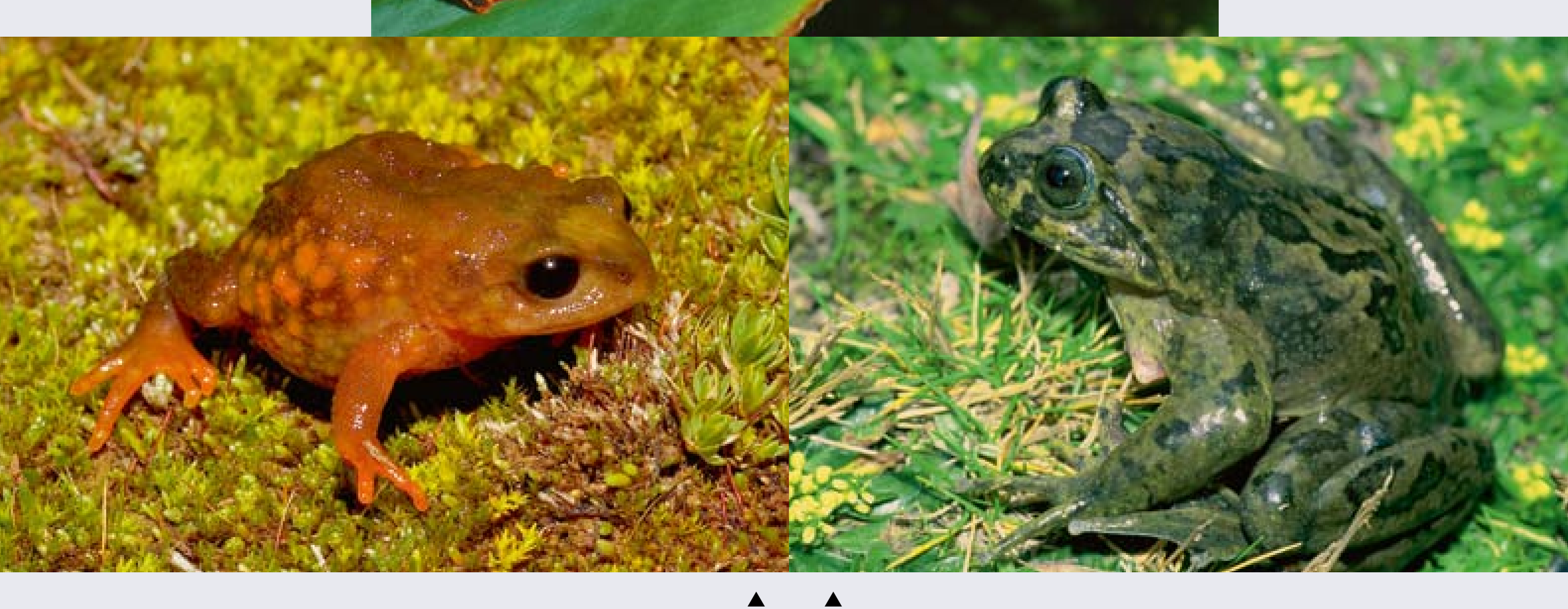
OREOBATES: Este género presenta su mayor diversidad en los bosques húmedos andinos situados entre Ecuador y Argentina. En la imagen, *O. machiguenga*.





RÍO EN LA RUTA ANDINA DE EL TAKESI, en La Paz, un antiguo camino precolombino. Este tipo de hábitats húmedos suelen albergar diferentes especies de anfibios de desarrollo directo, sin fase larvaria.

ATELOPUS: En las tierras altas de Centro y Sudamérica este género se ha visto gravemente afectado por la quitridiomicosis, con decenas de especies quizá ya extintas. En la imagen, *A. loettersi*.



MICROKAYLA: Recientemente descrito y endémico de Perú y Bolivia, este género representa un caso extremo de diversificación. Reúne un gran número de especies con distribuciones muy restringidas.

TELMATOBIUS: Este género de ranas acuáticas endémico de los Andes presenta muchas especies gravemente amenazadas o incluso ya extintas, principalmente por culpa de la quitridiomicosis. En la imagen, *T. bolivianus*.

por Enrique Perdiguero



Enrique Perdiguero, catedrático de historia de la ciencia en la Universidad Miguel Hernández de Elche, es experto en historia de las medicinas alternativas y complementarias.

Comprender el pluralismo médico

Las ciencias sociales arrojan luz sobre el complejo panorama actual de las medicinas alternativas

En lo que llevamos de siglo xxi, las medicinas «alternativas» (en el sentido amplio de «diferentes a la medicina científico-experimental») han concitado atención —y polémica— en diversos ámbitos. Mientras su presencia en los países desarrollados aumenta y algunas instituciones internacionales promueven su uso, otras iniciativas oficiales tratan de ponerles freno. Las tensiones son evidentes.

Nos hallamos ante un problema complejo que no puede entenderse desde una perspectiva cientificista. En este artículo trataremos de arrojar luz sobre este fenómeno a partir de los enfoques que nos ofrecen la historia y la antropología médicas. Veamos con mayor detalle algunas de las cuestiones subyacentes.

¿Tradicional, alternativa o complementaria?

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha puesto en marcha dos planes (2002-2005, 2014-2023) para utilizar la medicina tradicional en la asistencia sanitaria. Este organismo entiende por medicina tradicional (MT) el conjunto de conocimientos, aptitudes y prácticas basados en teorías, creencias y experiencias indígenas de las diferentes culturas —sean o no explicables—, usados para el mantenimiento de la salud, así como para la prevención, el diagnóstico, la mejora o el tratamiento de enfermedades físicas o mentales. La cuestión de la que parte la OMS es que la MT es una forma de atención sanitaria muy accesible y asequible en muchos países con ingresos bajos, por lo que debe incluirse en los planes para mejorar el estado sanitario, siempre y cuando su eficacia y seguridad estén demostradas.

En los países más desarrollados, el uso de algunas de las formas de sanar que entran dentro de la MT tienen otro matiz: solemos referirnos a ellas como medicinas alternativas y complementarias (MAC). Para la OMS constituyen un conjunto amplio de prácticas de atención sanitaria que no forman parte de la propia tradición del país y no están integradas en el sistema sanitario principal.

La MT y las MAC engloban formas muy variadas de entender la salud y la enfermedad. Además, se solapan, puesto que las formas propias de sanar en algunos países, esto es, tradicionales, son MAC en otros. Es el caso de sistemas médicos bien establecidos como la medicina tradicional china o la medicina ayurveda (India), que en Occidente se consideran MAC.

La presencia de las MAC en los países más desarrollados ha aumentado en los últimos años. Sin embargo, la dimensión de tal aumento es difícil de valorar. Las encuestas no se interesan siempre por el mismo tipo de terapias, por lo que no siempre resultan comparables. En España, por ejemplo, las Encuestas Nacionales de Salud solo inquieren de manera individualizada por el uso de la homeopatía y la acupuntura, muy bajo en ambos casos. En cambio, el Centro de Investigaciones Sociológicas, en su último estudio de febrero de 2018, considera muchas más formas de sanar, desde las más conocidas hasta otras de equívoco significado como la «terapia nutricional». Y todavía es mayor el número de prácticas que han sido incluidas en el reciente plan del Gobierno para la protección frente a las pseudoterapias (www.conprueba.es), un término que se ha adoptado muy recientemente para denominar a las MAC.



Asimismo, el estatuto legal de las MAC es muy variado. Las diferencias de regulación en los diferentes países miembros de Unión Europea son enormes: desde la existencia de leyes específicas a la total ausencia de reglamentación. La Unión Europea tiene el reto de armonizar esta situación, algo verdaderamente difícil, dadas las diferentes tradiciones nacionales.

La importancia de la cultura

Nos encontramos, por tanto, ante un problema complejo. En gran parte del mundo es preciso recurrir a la MT para asegurar la asistencia del conjunto de la población. En los países ricos, las MAC suponen una opción que va ganando presencia, a pesar de la accesibilidad y la capacidad diagnóstica y terapéutica de la medicina científico-experimental. Para tratar de comprender este fenómeno, sobre todo el que nos resulta más cercano, el uso de las MAC, es preciso considerar las aportaciones realizadas por las ciencias sociosanitarias en los últimos cincuenta años. Comencemos por dos conceptos que nos pueden resultar muy útiles: el pluralismo médico (o asistencial) y los itinerarios terapéuticos.

Se entiende por pluralismo asistencial la presencia de diversas opciones para afrontar los problemas de salud, sea cual sea su origen, estatuto científico o legal. Las personas que perciben que un determinado malestar requiere tomar algún tipo de acción recurren a una o varias de esas opciones. El orden en el que lo hacen y las razones que lo determinan definen el itinerario terapéutico.

Tanto las opciones como los itinerarios han de situarse en sus coordenadas históricas, sociales, económicas, políticas

y culturales. Un elemento muy sustancial a la hora de estudiar el pluralismo médico y los itinerarios terapéuticos es el patrón epidemiológico, esto es, el tipo de enfermedades y causas de mortalidad que se dan en una sociedad. Las enfermedades infecciosas, que han sido la causa de mortalidad predominante hasta hace pocas décadas —y lo siguen siendo en buena parte del globo—, generan patrones de uso de las instancias asistenciales muy diferentes a los que se derivan de los trastornos crónico-degenerativos, los más frecuentes en los países desarrollados.

La historia de la medicina ha mostrado que no ha existido una distinción clara entre la medicina «oficial» y la medicina «popular». La porosidad entre ambas era muy acusada y no era posible desligar lo que se hacía para luchar contra la enfermedad sin tener en cuenta la esfera de lo religioso, muy relevante en la mayoría de las sociedades. Otro elemento que hay que tener en cuenta a la hora de comprender por qué se utilizaba una u otra terapia es el escenario asistencial, es decir, el espacio físico. Las opciones terapéuticas más cercanas al ámbito doméstico solían ser las más utilizadas, pero si la expectativa de sanar suponía viajar en búsqueda de un determinado médico o curandero, no se descartaban los desplazamientos.

La mirada histórica también permite ver que el poder de los profesionales sanitarios ha ido en aumento. Respaldados por las autoridades, han ido conquistando el monopolio de la gestión de la salud y la enfermedad. Con todo, tal conquista nunca ha sido completa, y el pluralismo médico sigue vigente en todo tipo de sociedades.

La sociología y la psicología social han tratado de explicar las razones de tal pervivencia a partir de una serie de modelos sobre la conducta de enfermar. En ellos, tras la experiencia de los síntomas, la población entra en contacto con la asistencia sanitaria y sigue las instrucciones del médico para volver lo antes posible a la situación previa a la enfermedad. Lo que se espera es que quien acude al médico adopte el papel de paciente-dependiente, y obedezca sus instrucciones. El incumplimiento de estas se explicaría por una serie de variables sociodemográficas (edad, nivel de instrucción, renta y otras características del «enfermo»), por la falta de accesibilidad a los servicios sanitarios oficiales y por las creencias de la población.

Pero esos modelos no explican dos cuestiones de gran relevancia. La primera tiene que ver con el límite a partir del cual consideramos que un malestar es lo suficientemente intenso para iniciar la búsqueda de su solución. Esta frontera no está establecida solo por los síntomas —al fin y al cabo, una interpretación de las sensaciones corporales—, sino también por la construcción sociocultural de la enfermedad. La sociedad determina lo que es y lo que no es enfermedad. Y en los países desarrollados, donde cada vez más problemas de todo tipo están bajo escrutinio médico, dificultades que antes eran consideradas circunstancias de la vida se ven ahora como «anomalías» que deben corregirse mediante ayuda experta. Es lo que se conoce como medicalización, o medicamentalización, si el problema se define en torno a un fármaco, como ocurre con el TDAH o la disfunción eréctil. Además, las expectativas generadas por la medicina científico-experimental implican que el nivel tolerado de malestar es cada vez menor.

La segunda cuestión es: ¿qué ocurre cuando, tras seguir las instrucciones de los profesionales, no se logra la vuelta a una vida normal? En un contexto de trastornos crónico-degenerativos, se convive con enfermedades de las que no necesariamente se muere si se controlan (diabetes mellitus, hipertensión), pero que no se curan y requieren cambios importantes en el estilo de vida. O bien, nos encontramos con enfermedades invalidantes sin cura (artritis, artrosis, fibromialgia): ¿qué hacer entonces?

La antropología médica ha tratado de ofrecer explicaciones que superen las limitaciones de los modelos que solo consideran adecuada la opción de la medicina científico-experimental. En ellas se da un valor preponderante a la cultura, como modo compartido y socialmente aprendido de dar significado, en este caso, a la salud y la enfermedad. El énfasis se ha puesto en la función clave del círculo más próximo al que padece. Un alto porcentaje de lo que puede convertirse en un problema es solventado mediante el autocuidado, la automedicación y la ayuda de familia y amigos. El ámbito doméstico, además, orienta el uso de los otros sectores asistenciales: la medicina oficial, los sanadores locales (curanderos, especialistas en síndromes culturalmente definidos como el mal de ojo o el empacho, herbolarios, etcétera) y las MAC. El uso de uno de estos sectores estaría gobernado por múltiples factores, entre los que resaltan el acuerdo sobre el significado cultural de los síntomas, las esperanzas de éxito que se depositan en cada instancia asistencial o las modificaciones en las actividades de la vida normal que requiere su utilización (consultar al farmacéutico sobre un determinado síntoma suele hacerse porque resulta más inmediato y cómodo).

En la mayoría de los países occidentales, son las mujeres de mediana edad con estudios universitarios y nivel social medio-alto o alto las que más usan las MAC. No parece que sea la falta de instrucción o recursos, el déficit de información o la poca disponibilidad de servicios sanitarios lo que las lleve a ello. Sin embargo, puede ser que las MAC les ofrezcan un espacio para poder gestionar una mayor preocupación por el bienestar y les permitan ejercer un papel más activo en el control de su salud, frente al papel pasivo que supone el consumo de fármacos. Tampoco es de extrañar que frente a padecimientos crónicos se busquen alternativas, aunque los ancianos con varias enfermedades no suelen recurrir a las MAC, pero sí combinar varias opciones asistenciales.

Desde el punto de vista de la integración sociocultural, el uso simultáneo de diversas alternativas asistenciales resulta, pues, comprensible. Por supuesto, ello no es óbice para que se deban evitar las opciones que puedan suponer riesgos para la salud o generar vanas expectativas. Pero solo si tenemos en cuenta todas las variables en juego —no solo las estrictamente «médicas», sino también las sociales y culturales— podremos protegernos de estas alternativas perjudiciales. IyC

PARA SABER MÁS

A new medical pluralism. Complementary medicine, doctors, patients and the state. Dirigido por S. Cant y U. Sharma. Routledge, 1999.

Una reflexión sobre el pluralismo médico. Enrique Perdiguero Gil en *Salud e interculturalidad en América Latina.* Dirigido por Gerardo Fernández Juárez. Ediciones Abya-Yala 2006.

Alternative medicine? A history. Roberta Bivins. Oxford University Press, 2007.

Medical pluralism. Past-present-future. Dirigido por Robert Jütte. Franz Steiner, 2013.

Los enfermos en la España barroca y el pluralismo médico. Espacios, estrategias y actitudes. Carolin Schmitz. CSIC, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Historia de la medicina, una asignatura pendiente en la formación de los médicos. Jon Arrizabalaga en *IyC*, octubre de 2016.

¿Qué significa estar sano o enfermo? Cristian Saborido en *IyC*, enero de 2018.

por Rebecca Nebel

Rebecca Nebel es directora de programas científicos de la Sociedad para la Investigación de la Salud de las Mujeres, una entidad estadounidense sin ánimo de lucro.



Alzhéimer: diferencias entre sexos

Para combatir la enfermedad, es preciso examinar los riesgos propios de mujeres y hombres

Aunque hacerse mayor resulte inevitable, sufrir la enfermedad de Alzheimer no lo es. No podemos detener el proceso de envejecimiento, el mayor factor de riesgo de esta demencia, pero sí modificar otros muchos factores que influyen en su desarrollo.

No obstante, la falta de conocimientos sobre cómo y por qué difiere la enfermedad entre mujeres y varones supone un obstáculo a la hora de disminuir ese riesgo e idear nuevas estrategias de prevención y tratamiento. Se han descubierto indicios prometedores sobre los factores que actúan de distinta manera en cada sexo, tales como las hormonas y determinados genes; así pues, el examen de esas diferencias constituiría una importante vía de investigación. Por desgracia, según mi experiencia, la mayoría de los estudios sobre el riesgo de alzhéimer examinan los datos de varones y mujeres conjuntamente.

Por este motivo, investigadores de la Red Interdisciplinaria sobre la Enfermedad de Alzheimer de la Sociedad para la Investigación de la Salud de las Mujeres publicó el año pasado un artículo de revisión en *Alzheimer's & Dementia: The Journal of the Alzheimer's Association*, que reclamaba más análisis de los datos en función del sexo para fomentar nuevas estrategias que mejoren la prevención, el diagnóstico y el tratamiento del alzhéimer.

Algunas pruebas indican que las hormonas sexuales, como los estrógenos, influyen en la evolución de la enfermedad, pero no sabemos bien cómo ni por qué. Los ovarios son la principal fuente de estrógenos en las mujeres premenopáusicas, y su extirpación quirúrgica antes de la menopausia se asocia a un mayor riesgo de demencia. Este desaparece si se ofrece tratamiento estrogénico después de la intervención y hasta los 50 años. Tal observación hace pensar que los estrógenos ejercen un efecto protector en las mujeres premenopáusicas.

En cuanto a los varones, los estudios sobre si el tratamiento de privación androgénica, empleado para el cáncer de próstata, aumenta el riesgo de alzhéimer arrojan resultados contradictorios. Se precisan más trabajos sobre el papel de las hormonas sexuales, el uso de diferentes tratamientos hormonales y la repercusión de estos dos factores en el riesgo de alzhéimer.



Entre las circunstancias negativas que afectan a ambos sexos, algunas son más frecuentes en uno ellos. A título de ejemplo, la depresión y la apnea del sueño son factores de riesgo de demencia, pero la depresión es el doble de frecuente en las mujeres, mientras que la apnea es mucho más común en los varones. Del mismo modo, un bajo nivel de estudios y escasos logros laborales pueden aumentar la probabilidad de sufrir alzhéimer, pero tradicionalmente las mujeres no han tenido el mismo acceso a la educación ni iguales oportunidades laborales que los varones, lo que aumenta su riesgo.

El alelo e4 del gen *APOE* es el factor genético más importante y frecuente en ambos sexos, aunque confiere mayor riesgo a las mujeres. Así, la probabilidad de padecer alzhéimer es más elevado en las mujeres con *APOE* e4 que en las mujeres sin el alelo y que en los varones con o sin él.

También es de suma importancia conocer cómo influye el sexo sobre los factores de riesgo en diversos momentos de la vida. Por citar un caso, en las enfermedades cardiovasculares, la aspirina reduce la probabilidad de infarto de miocardio y de ictus en las mujeres a partir de los 65 años, pero dicho efecto no se observa en las más jóvenes. Cabe la posibilidad de que ciertos factores de riesgo de alzhéimer sean más determinantes en ciertos momentos de la vida, por lo que investigar esta correlación es fundamental para la prevención y la intervención temprana.

Los factores de riesgo son solo una de las áreas en las que se precisa más investigación sobre las diferencias sexuales en el alzhéimer. Los científicos han pasado por alto con frecuencia tales diferencias en el diagnóstico, el diseño de los ensayos clínicos, la evaluación del efecto del tratamiento y los cuidados. Este sesgo ha dificultado el progreso en la detección y el tratamiento.

Los enfoques que contemplan el sexo en la investigación han impulsado los avances en numerosas enfermedades. Es necesario hacer lo mismo en el alzhéimer. El estudio de las diferencias sexuales mejorará de manera considerable los conocimientos sobre este «ladrón de mentes» y las perspectivas de salud para todos. IyC

CORNELIA LI

CIUDADES

El restablecimiento de corrientes naturales de agua en las urbes



EL PARQUE YANWEIZHOU (*centro*) protegió a la ciudad china de Jinhua de una inundación al absorber las crecidas del río durante un intenso monzón.

ESPONJA

puede reducir el impacto de inundaciones y sequías

Erica Gies





Erica Gies escribe sobre ciencia y medioambiente. Sus trabajos aparecen en *Nature*, *bioGraphic* y *New York Times*, entre otras publicaciones.

El 21 de julio de 2012 cayeron sobre Pekín 280 milímetros de lluvia que anegaron carreteras y pasos subterráneos. El arquitecto paisajista Yu Kongjian apenas pudo llegar a casa después de trabajar. «Tuve suerte», declara. «Vi a muchas personas abandonar su coche.» La ciudad quedaba sumida en el caos. La mayor tormenta que ha azotado Pekín en más de 60 años quitó la vida a 79 personas, la mayoría ahogadas en su vehículo o engullidas por el alcantarillado. Los daños se estimaron en casi 2000 millones de dólares.

En opinión de Yu, cofundador de la compañía de arquitectura paisajista Turenscape, el desastre fue el resultado de un desarrollo urbano negligente y podía haberse evitado. El empresario ya había alertado al ayuntamiento unos años antes, tras dirigir una investigación para cartografiar el «grado de seguridad ecológica» de la metrópoli. En el mapa identificó zonas de elevado riesgo de inundación que deberían mantenerse sin urbanizar y emplearse para gestionar las aguas pluviales. «De la inundación aprendimos que conocer la seguridad ecológica es una cuestión de vida o muerte», afirma.

En todo el país se han vivido situaciones similares. Entre 2011 y 2014 se inundaron el 62 por ciento de las ciudades, lo que significó unas pérdidas de unos 100.000 millones de dólares, según el Ministerio Chino de Vivienda y Desarrollo Urbano y Rural. Las inundaciones responden, en parte, a las fuertes tormentas avivadas por el cambio climático. Pero los daños son, en esencia, autoinfligidos: la intensa urbanización de los últimos treinta años ha fagocitado humedales, devastado bosques, pavimentado granjas y pastos y encorsetado ríos en canales de hormigón. Todo ello ha causado que la lluvia que antes se filtraba en el suelo ahora solo pueda discurrir por la superficie.

Además, la expansión urbana está exacerbando la escasez de agua en China. Los edificios, las calles y los aparcamientos impiden que la lluvia recargue los acuíferos. En cambio, los desagües y las tuberías la canalizan fuera de las poblaciones, un hecho demencial en un lugar con escasez de agua, según Yu. Al igual que otras poblaciones del norte de China, Pekín es una ciudad seca, excepto en la época del monzón estival. Durante décadas ha bombeado agua subterránea para abastecer a su creciente población. La ciudad rebaja el nivel freático cerca de un metro al año, lo que trae consigo una subsidencia del terreno.

Las ciudades de todo el planeta comparten problemas semejantes debido al desarrollo y el intento de controlar el agua con infraestructura «gris»: presas de hormigón, diques, tanques de agua de lluvia, conductos y ríos amurallados cuyas llanuras de inundación están cubiertas por edificios. Los expertos están reconociendo que, al romper el ciclo hidrológico natural, las ciudades aumentan la probabilidad y la severidad de las inundaciones, lo que acarrea desastres desde Houston hasta Madrás.

Yu encabeza un movimiento global de urbanistas, gestores hídricos, ecólogos e ingenieros que se esfuerzan por restablecer los ciclos hidrológicos naturales. El trabajo consiste, de algún modo, en hacer ingeniería «inversa»: conceder al agua un espacio que le permita expandirse o contraerse con el fin de reducir y ralentizar las inundaciones, de forma que pueda filtrarse en el terreno y evitar así las consiguientes restricciones. Los profesionales preservan o restauran llanuras de inundación y humedales, desentierran arroyos y crean sistemas de biofiltración, estanques de retención, parques hundidos y aparcamientos permeables. A diferencia del paisaje de materiales duros, la infraestructura verde también puede depurar el agua y recrear un hábitat para la fauna. Y, además, ofrece a los ciudadanos acceso a la naturaleza, un espacio recreativo reconocido cada vez más como un pilar fundamental de la salud mental.

Los proyectos paisajísticos locales están emergiendo en todas partes. Pero Yu y otros profesionales reconocidos tratan de gestionar el agua a mayor escala: ciudades o cuencas enteras. Conocida como infraestructura verde en Europa, desarrollo de bajo impacto en EE.UU. y ciudades esponja en China, su enfoque consiste en imitar la naturaleza todo lo posible, afirma Tony Wong, ingeniero y director ejecutivo del Centro de Investigación Cooperativa para Ciudades Vulnerables al Agua, con sede en Melbourne. El objetivo es crear infraestructura hídrica que «funcione como un organismo vivo», explica el experto.

El impulso de las ciudades esponja está ganando inercia. En marzo de 2018, las Naciones Unidas publicaron un informe que aboga por esa perspectiva. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU., tristemente conocido por sus robustas obras de ingeniería en ríos y humedales, ha planteado la iniciativa Ingeniería con la Naturaleza. Tras siglos construyendo diques para contener el agua, los holandeses también se suman a la idea. Después de un evento casi catastrófico en 1995, cuando crecieron los ríos Rin, Mosa y Waal y tuvieron que evacuarse 250.000 personas, el Gobierno creó un programa nacional llamado Espacio para el Río. En lugar de limitarse a construir presas y diques cada vez más grandes, los políticos ampliaron la capacidad de los deltas fluviales solicitando a los granjeros que aceptaran mudarse o permitieran anegar sus tierras según fuera necesario.

China, una nación de Gobierno centralizado que presenta un rápido crecimiento, está apostando por las ciudades esponja a una escala que la mayoría de los países ni siquiera podría considerar. Las aspiraciones son realmente impresionantes. Aun así, Yu se encuentra con que todavía debe vencer la tendencia

EN SÍNTESIS

Las inundaciones y las sequías paralizan numerosas áreas urbanas. Los ríos canalizados con hormigón, los tanques de agua pluvial y los conductos no dan abasto.

Un enfoque de planificación urbana conocido como «ciudades esponja» podría mitigar de forma más efectiva las inundaciones, almacenar agua para las estaciones secas y reducir la contaminación hídrica.

El arquitecto Yu Kongjian abre el camino a medida que China remodela ciudades y diseña otras nuevas para acoger los flujos naturales de agua en lugar de luchar contra ellos.

PÁGINAS ANTERIORES: TURENSCAPE



LOS LAGOS KABAN, en Kazán, estaban contaminados y tendían a inundarse. Hoy sus riberas rediseñadas absorben y depuran la escorrentía urbana.

de los urbanistas a adoptar enfoques únicos y aplicables a todos los casos, un planteamiento que podría ser nefasto puesto que cada población tiene sus propios sistemas y necesidades hídricos. También se enfrenta a un país que muestra predilección por construir presas más resistentes, conductos más grandes y tanques de almacenamiento con mayor capacidad, un símbolo del poder y el progreso de la China moderna.

EL SEÑOR DE LOS PROYECTOS

Un día de primavera visité a Yu en la sede de Turenscape, en el distrito pekinés de Haidian. Con más de cincuenta años, Yu, un hombre esbelto y vivaz, creció en una comunidad agrícola de la provincia de Zhejiang, al suroeste de Shanghái. Allí fue testigo de la milenaria «sabiduría campesina» para gestionar el agua. Los granjeros preservaban pequeños estanques y bermas para que el agua de lluvia se infiltrara en el suelo y se almacenara para las temporadas más secas. Cuando el arroyo cercano a su pueblo crecía, nadie lo veía como una amenaza. «Si se gestionan las inundaciones con inteligencia, el agua puede volverse amistosa.»

Desde que comenzó la andadura de Turenscape en 1998 junto con su mujer y un amigo, Yu ha convertido la galardonada compañía en un imperio de arquitectura paisajística con 600 empleados. La empresa cuenta con más de 640 proyectos, ya ejecutados o en vías de hacerlo, en 250 ciudades chinas y en otros diez países. Entre ellos figura el nuevo diseño del sistema lacustre de Kaban, en Kazán. Yu es decano de la Escuela de Paisajismo de la Universidad de Pekín y ha impartido clases periódicamente en la Universidad Harvard.

Durante años, mientras Yu creaba la cartera de proyectos de su compañía, un buen número de compatriotas se burlaba de sus ideas, tachándolas de retrógradas. Según él, algunos incluso lo consideraban un espía estadounidense, en referencia a su doctorado en la Escuela Universitaria de Diseño de Harvard y a su oposición a las grandes presas. Pero en los últimos años, las opiniones han comenzado a dar un giro. Una serie de equipos chinos están diseñando proyectos de infraestructura verde, a menudo en colaboración con otros grupos estadounidenses, australianos y europeos. La influencia de Yu ha ido aumentando de forma paralela. Habitualmente imparte clases en el Ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano y Rural, y su libro acerca de sus métodos, *The road to urban landscape: A dialogue with the mayors*, se ha reeditado en China en múltiples ocasiones.

La inundación de Pekín de 2012 supuso un punto de inflexión. Poco después del suceso, un proyecto de Turenscape de aguas pluviales para la ciudad de Harbin ganó uno de los premios de diseño más prestigiosos de EE.UU. La Televisión Central China retransmitió una extensa entrevista con Yu que tuvo una gran repercusión mediática. Un ministro del Gobierno le informó después que la había visto Xi Jinping, que pronto se convertiría en presidente. Un año más tarde, en el congreso sobre la urbanización del centro de China, el presidente anunciaba su iniciativa Ciudades Esponja. Con ella, la idea pasaba de ser un concepto conflictivo a convertirse en un objetivo nacional.

En 2015, el Gobierno inició 16 proyectos de demostración que ocupaban al menos 10 kilómetros cuadrados cada uno. Hoy son 30. Los objetivos consisten en reducir las inundaciones urbanas, retener el agua para su uso futuro, depurar cuerpos de agua contaminada y mejorar los ecosistemas naturales. Supuestamente, hacia 2020 cada proyecto retendrá entre el 70 y el 90 por ciento de la pluviosidad media local anual. En su informe gubernamental de 2017, el líder Li Keqiang anunció que la construcción de ciudades esponja continuaría ampliándose.

UN RÍO RECONSTRUIDO

Una semana después de mi entrevista con Yu, visité uno de los últimos proyectos de Turenscape, el parque fluvial Yongxing, en Daxing, un distrito situado en las afueras de Pekín. En las fotografías previas al proyecto, tomadas por satélite hace tres años, se observa un terreno abierto en las proximidades del río, encauzado en línea recta y confinado entre abruptos muros de hormigón. Las imágenes actuales se ven abarrotadas de edificios.

El Gobierno reconoce que el desarrollo reduce la infiltración de la lluvia, así que invitó a Turenscape a diseñar un parque que ampliara el cauce del río para retener más agua. Cuando visité el proyecto, a comienzos de abril de 2018, estaba casi completado. Con una longitud de unos dos kilómetros y una anchura de unas dos manzanas, el parque se extiende a lo largo del río. Nos hallamos en una extensa berma que divide el cauce en dos canales. El río fluye a nuestra derecha, mientras que en el canal de la izquierda hay unos grandes agujeros de distinta profundi-

TURENSCAPE

dad. Durante la estación seca, los agujeros se llenarán de aguas residuales parcialmente limpias procedentes de una depuradora. Unas plantas típicas de humedales depurarán más el agua de los hoyos, y una parte se filtrará hacia los acuíferos. Durante el monzón, el canal se destinará a las aguas de inundación, mientras que las aguas residuales se tratarán industrialmente.

El plan de Turenscape implicaba retirar el hormigón que bordeaba el río y excavar el terreno para ampliar su cauce. La tierra extraída se vertió después en la gran berma. Hoy, las riberas están salpicadas por apretadas hileras de miles de pequeños juncos que sujetan el suelo. Los proyectos de Turenscape recurren a plantas autóctonas, porque «se adaptan al ambiente local», explica Yu, «no necesitan un aporte adicional de agua».

Las primeras instalaciones ya están demostrando su eficacia. El parque Yanweizhou, en Jinhua, cerca de donde creció Yu, puso a salvo la ciudad absorbiendo una avenida de 100 años de período de retorno. El parque Houtan, en Shangái, de 14 hectáreas, depura hasta 2400 metros cúbicos diarios de agua fluvial contaminada y ha mejorado la calidad de esta desde el grado V (no apta para el contacto humano) al grado II (apta para la irrigación) basándose únicamente en procesos biológicos.

Los proyectos de ese tipo optimizan su eficacia cuando se hallan conectados con otras infraestructuras verdes en la misma cuenca, lo que permite al flujo del agua aproximarse al que sería su camino natural. Por toda la geografía china, las ciudades nuevas que se están construyendo dan muestra de las posibilidades. Turenscape ha completado parte de la ambiciosa ecociudad Wulijie, en la provincia de Hubei. En ella se preservan los humedales naturales para retener y depurar aguas pluviales in situ. El plan redujo los costes asociados a la construcción de tubos de desagüe y conservó el hábitat de plantas y animales. Los edificios están dotados de azoteas ajardinadas y jardines verticales; una serie de senderos peatonales y caminos para bicicletas surcan los espacios verdes.

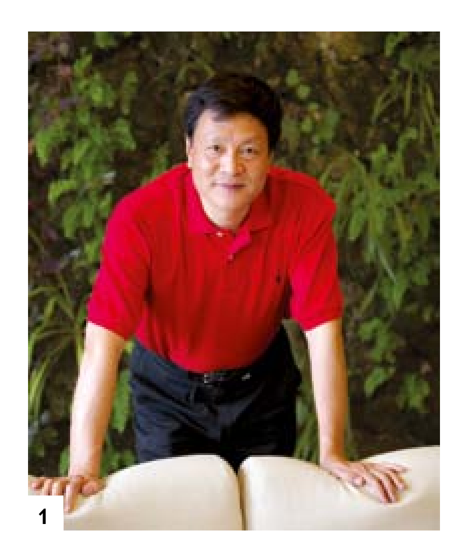
MÁS ALLÁ DE LAS CIUDADES

Sin embargo, no es fácil hacerle un hueco al agua en un entorno ya construido. Los arquitectos deben introducir con calzador sus proyectos en la infraestructura existente. En Houston, los urbanistas se limitan con frecuencia a construir sistemas de drenaje de biofiltración en nuevos complejos de apartamentos. En San Francisco, los obreros han levantado con taladradoras aceras y medianas de carretera para hacerle un sitio a las plantas.

De ahí el atractivo de zonas industriales descuidadas, listas para una drástica recuperación. Turenscape supervisó la fase inicial de un proyecto de ese tipo en Kazán, una ciudad que rodea tres meandros abandonados del río Volga. Durante el período soviético, la contaminación causó la práctica desaparición de la vida lacustre. Además, debido al modo en que se habían construido las presas, la ciudad tendía a inundarse. Durante las crecidas, las siete estaciones de bombeo municipales no daban abasto.

El diseño de Turenscape, que casi ya ha finalizado, apuesta por el saneamiento de 11 kilómetros cuadrados de terreno destinados a las aguas de inundación del río y sus afluentes. La ciudad está construyendo en esa zona parques lineales, paseos y biofiltros que ralentizan, infiltran y depuran las aguas de escorrentía urbanas antes de que se viertan en los lagos. Los senderos para caminar o ir en bicicleta permiten el acceso de los ciudadanos a las zonas ribereñas y fomentan el transporte de tracción humana por la ciudad.

El alcance de tales remodelaciones alienta a Yu a soñar, más allá de las ciudades esponja, con lo que él denomina «regiones


1


2

esponja». Su aspiración es cuidar de todo el territorio nacional. «El agua es un sistema más grande que las ciudades», afirma.

Inspirado en parte por el paisajista estadounidense Warren Manning, quien ideó un Plan Nacional para EE.UU. hace un siglo, Yu trabaja en un plan maestro de paisajismo para toda China. «Es una perspectiva increíble», comenta Niall Kirkwood, profesor de arquitectura paisajista y tecnología en la Escuela Universitaria de Diseño de Harvard, que conoce a Yu desde hace años. «Nadie piensa a esa escala y con esa sensatez política.»

En las paredes del despacho de Yu cuelgan mapas de China con datos sobre elevaciones, cuencas y trayectorias de inundaciones, así como de biodiversidad, desertificación, seguridad ecológica, erosión de suelos y herencia cultural. En su gran plan, Yu dispone de ellos, además de un sistema de información geográfica e imágenes por satélite, para seguir los cambios en la geografía china a medida que la urbanización avanza, los estuarios y los deltas se colman de sedimentos, y la trayectoria del agua se modifica. Identifica las áreas donde los proyectos tendrán las mayores repercusiones. Según Kirkwood, la idea se asemeja a la acupuntura. Yu «entiende que las obras realizadas en un área tendrán efecto en otra», señala. Comparado con otros paisajistas, «piensa de forma mucho más holística».

SOLUCIONES A MEDIDA

La vivienda de Yu, un dúplex de apartamentos adosados que comparte con su hermana, da testimonio de sus ideas. Los dos apartamentos se encuentran separados por un jardín vertical que Yu construyó con roca caliza porosa. El agua capturada por los tejados gotea por el muro, de donde brotan culantrillos y filodendros. Yu asegura que el jardín enfría los dos hogares lo suficiente como para poder prescindir del aire acondicionado.

Las terrazas de los dormitorios se riegan con el agua de lluvia recogida en los tejados, almacenada en unos tanques situados bajo lechos de plantas. De la terraza de Yu emana una fragancia de romero, hierbaluisa y crisantemos chinos. Hasta discurre un diminuto arroyo donde nadan peces dorados. Al otro lado del jardín vertical, la terraza de su hermana dispone de unos lechos escalonados rebosantes de lechugas y acelgas.

Así como las ideas del domicilio de Yu son aplicables a muchos otros edificios, cada ciudad esponja debe diseñarse atendiendo a los factores climáticos, edáficos e hidrogeológicos locales. «Cada paciente necesita una solución distinta», afirma Yu. Existe el peligro de que los urbanistas chinos se precipiten e ignoren ese

TURENSCAPE



YU KONGJIAN (*1*), frente al jardín vertical de su domicilio. El paisajista ha promovido proyectos de ciudades esponja en China, incluido un parque de agua pluvial en Harbin (*2*).

hecho. De hacerlo, la ambiciosa iniciativa de las ciudades esponja podría flaquear, en opinión de Chris Zevenbergen, experto en gestión del riesgo de inundaciones del Instituto IHE de Delft para la Educación en Hidrología y profesor visitante en Nankín y Chengdu. La tendencia a tomar soluciones rápidas y estereotipadas a la hora de levantar ciudades en los últimos veinte años impidió que los constructores vieran las imperfecciones del diseño y realizaran adaptaciones. De ahí que numerosas ciudades padezcan hoy inundaciones, explica el experto. La construcción de ciudades esponja iguales entre sí podría derivar en problemas similares. Los plazos del programa de Xi son tan estrictos que podrían no dejar tiempo para evaluar el resultado y realizar los ajustes necesarios, señala Zevenbergen.

En un artículo de 2017, algunos institutos de investigación gubernamentales expresaron preocupaciones similares. A fin de establecer unas directrices, el Gobierno ha creado un comité compuesto por ingenieros, economistas y paisajistas, incluido Yu.

La idea de las ciudades esponja se enfrenta también a otras dificultades. Se necesitará inversión privada para implementar por completo el plan nacional. Pero Yu teme que a las compañías les atraigan más los conductos y los diques —elementos que pueden cobrar— que los sistemas naturales de las ciudades esponja.

El interés de la idea no se limita únicamente a la mitigación de inundaciones y sequías. Xi también quiere que las ciudades esponja lidien con otra cuestión importante: la contaminación. Nutrientes, metales pesados, pesticidas y microplásticos enturbian las aguas superficiales del país, según Randy Dahlgren, científico de la Universidad de California en Davis que ha trabajado en la provincia de Zhejiang. «Si logran que el agua se infiltre en el suelo, buena parte de esos contaminantes potenciales quedará retenida en los sistemas de humedales, zonas de amortiguación, cuencas de detención y biofiltros», afirma.

Sin embargo, los humedales no pueden construirse para luego quedar olvidados. El fósforo, los metales pesados y una parte del nitrógeno se acumulan en las plantas y regresan al suelo cuando la vegetación muere. «Las plantas deben cosecharse», apunta Dahlgren. Pueden transformarse en combustibles en forma de biomasa e incinerarse, aunque algunos contaminantes, como los metales, se concentran en la ceniza, que debe eliminarse. «Se requiere una gestión de los humedales para convertirlos en sumideros efectivos de numerosos contaminantes», opina el experto. Los urbanistas deberían proceder con cautela para no «convertir un problema de contaminación de aguas superficiales en uno de aguas subterráneas», donde las impurezas podrían persistir a lo largo de décadas e incluso siglos.

No obstante, si los urbanistas hacen lo necesario, los resultados podrían ser muy satisfactorios. Las ciudades esponja ya están reduciendo la contaminación en lugares como Filadelfia. Como en muchas ciudades estadounidenses, las aguas pluviales pasan por las plantas depuradoras y, al desbordarse durante una intensa tormenta, causan el vertido de aguas residuales en los ríos. Con su iniciativa Ciudad Verde, Agua Limpia, la ciudad está recuperando tierras en la ribera de arroyos y ríos locales para absorber el exceso de precipitaciones y construir parques inundables. Filadelfia también da incentivos a los dueños de terrenos que creen jardines infiltrantes, azoteas ajardinadas, granjas urbanas y pavimentos porosos. Tales técnicas permiten a las aguas infiltrarse en el suelo y reducir el volumen que penetra en el alcantarillado. En cinco años, la ciudad había «reverdecido» 339 hectáreas, lo suficiente para reducir la contaminación derivada del desbordamiento del alcantarillado.

ESTADO DE FLUJO

A diferencia de la infraestructura gris, los sistemas de gestión de aguas naturales no son estáticos y predecibles: la naturaleza es caótica. El agua asciende y desciende. Las plantas brotan, viven y mueren. El barro queda al descubierto. Aunque esos lugares pueden desprender cierta belleza, tal vez a los residentes no siempre les guste. Para que las ciudades esponja se expandan, sus habitantes deberán aceptar un ambiente dinámico.

Yu llama a ese cambio «estética de pies grandes», en contraposición a la antigua concepción china de considerar bonitos los pies diminutos y vendados de las mujeres aristocráticas. «Ahora necesitamos que los pies grandes nos parezcan atractivos», asegura. «Debemos cambiar nuestra estética para hacer que nos parezca bonita una infraestructura verde útil.»

Los educadores necesitarán también un cambio de perspectiva. Las escuelas chinas todavía forman a sus ingenieros con principios del siglo xx, explica Yu. «Estamos batallando por que la gente piense de un modo ecológico.» La arrogancia de creer que podemos controlar el agua con cemento se pondrá de manifiesto a medida que fallen ese tipo de proyectos, incapaces de amortiguar los efectos colaterales de un rápido crecimiento demográfico, la expansión urbanística y el cambio climático. Aunque las ciudades esponja quizá no protegerán a todo el mundo de los problemas asociados al agua, sus defensores estiman que pueden atenuarlos mejor que las alternativas de hormigón. Además, los múltiples beneficios que reportan pueden volver la vida humana, y la de otras especies, más saludable y feliz.

PARA SABER MÁS

Letters to the leaders of China: Kongjian Yu and the future of the Chinese city. Editado por Terreform. Terreform, 2018.

Informe mundial sobre el Desarrollo de los recursos hídricos de las Naciones Unidas 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. UNESCO, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Agricultura vertical. Dickson Despommier en *IyC*, septiembre de 2010.

Ciudades: Claves para comprender la complejidad urbana. VV.AA. en *IyC*, noviembre de 2011.

Capturar inundaciones para combatir sequías. Erica Gies en *IyC*, enero de 2018.

SALUD PÚBLICA

EL CAOS DEL DENGUE

¿Obedece el peligro creado por una vacuna contra esta enfermedad a una reacción inmunitaria desatada?

Seema Yasmin y Madhusree Mukerjee



ENTRE LOS VIRUS PELIGROSOS que transmite el mosquito *Aedes aegypti* se cuentan los cuatro causantes del dengue. La primera infección suele ser leve, pero la segunda puede resultar mortal, una peculiaridad que está causando problemas a la primera vacuna autorizada contra esta enfermedad.

Seema Yasmin, doctora en medicina y escritora, es directora de la Iniciativa de Comunicación Sanitaria y profesora de periodismo científico y narrativa sanitaria internacional, en la Universidad de Stanford. Como periodista, ganó un premio Emmy.



Madhusree Mukerjee es editora senior de *Scientific American* en ciencia y sociedad.

EN DICIEMBRE DE 2015, el entonces presidente de Filipinas Benigno Aquino III y otras personas cerraron un acuerdo con la farmacéutica Sanofi para la compra de tres millones de dosis de Dengvaxia, la primera vacuna autorizada contra el dengue. El plan contemplaba la administración de tres dosis a un millón de escolares de 9 años, con el fin de evitar las peores consecuencias de la infección: insuficiencia circulatoria aguda, fallo multiorgánico y muerte.



EXTRACCIÓN de una muestra de sangre a un niño de Managua para un amplio estudio sobre el dengue (*1*). Otro niño observa una calle de su barrio (*2*).

Las cuatro variedades (serotipos) conocidas del virus son propagadas por las hembras de mosquitos del género *Aedes*, en especial por *Aedes aegypti*. La picadura se produce sobre todo durante el día, cuando la víctima no goza de la protección de las mosquiteras. En los últimos cincuenta años, estos virus emparentados con los causantes de la fiebre del Nilo Occidental, la fiebre amarilla y el zika se han expandido en oleadas por los países tropicales y subtropicales hasta multiplicar por 30 la incidencia de la enfermedad, que ya afecta cada año a 390 millones de personas, con clara tendencia al alza.

No todos los infectados enferman y tres de cada cuatro no mostrarán síntomas. Los demás sufrirán uno de los tres síndromes siguientes: fiebre seudogripal, similar a la causada por muchos otros virus; «fiebre del dengue», acompañada de cefalea, dolor retroocular, articular y óseo y, en pocos casos, hemorragia interna; o un cuadro de suma gravedad, que abarca la fiebre hemorrágica y el síndrome de choque por dengue. En este concurren la extravasación (fuga) del plasma sanguíneo a través de los capilares, edema alrededor de los órganos, hemorragias internas generalizadas e insuficiencia cerebral, renal y hepática. El ingreso en una unidad de cuidados intensivos puede salvar la vida del enfermo, pero cada año fallecen más de 20.000 personas, muchas de ellas niños.

Como enfermedad temible que es, los médicos de los países en vías de desarrollo han aguardado con expectación una vacuna durante décadas. Cuando el internista Antonio Dans y la pediatra Leonila Dans, epidemiólogos de la Facultad de Medicina de Manila de la Universidad de Filipinas, se enteraron por el *Philippine Star* de la campaña de vacunación promovida por Aquino, lo primero que les sorprendió fue su coste. Solo con la adquisición de la vacuna, tres mil millones de pesos filipinos (algo más de 50 millones de euros), la campaña de Dengvaxia costaría más que todo el programa nacional de vacunación para el 2015, que cubría nueve enfermedades: neumonía, tuberculosis, poliomielitis, difteria, tétanos, tos ferina, sarampión, parotiditis y rubeola. Llegaría a menos del 1 por ciento de los casi 105 millones de habitantes del país. Y si bien, según los informes epidemiológicos, el dengue mata cada año a un promedio de 750 personas en Filipinas, ni siquiera se sitúa entre las diez primeras causas de muerte. En la categoría de enfermedades infecciosas, la neumonía y la tuberculosis se cobran muchas más vidas.

EN SÍNTESIS

El dengue es una enfermedad transmitida por mosquitos que afecta cada año a casi 400 millones de personas en el mundo. La mayoría de afectados ni siquiera se percata de la primoinfección, pero una segunda infección puede acabar con la vida.

Una antigua y controvertida teoría, la facilitación de la infección por anticuerpos (ADE, *antibody-dependent enhancement*), explica por qué esa segunda infección puede ser mortífera. Nuevos estudios apoyan con fuerza la hipótesis.

La primera vacuna autorizada contra el dengue recrea un primer contacto con el virus y es posible que exacerbe la segunda infección. El papel del ADE en este fenómeno sigue siendo controvertido.



2

en los lugares adecuados», es decir, en aquellas regiones donde al menos el 70 por ciento de la población hubiera sido afectada por el dengue, pues la vacunación de los adolescentes jóvenes reduciría los ingresos hospitalarios hasta en un 30 por ciento durante un período de 30 años. En un posterior informe de postura del mismo grupo, se afirmaba que la vacuna era segura a partir de los nueve años, por lo que se aconsejaba desde esa edad en adelante.

En perspectiva, a Dans y Dans no les sorprendió que las autoridades ignoraran sus inquietudes. «Se trataba de creer a la OMS o a nosotros. Yo, en su lugar, hubiera procedido igual. Porque, ¿quiénes éramos nosotros? Unos simples profesores de una pequeña facultad de medicina», confiesa Antonio Dans. Las autoridades filipinas parecían tan convencidas de la seguridad de Dengvaxia que no obligaron a Sanofi Pasteur a presentar los resultados de los estudios de farmacovigilancia, que deben supervisar periódicamente la seguridad de todo nuevo medicamento o vacuna sobre el terreno. La introducción de un nuevo producto farmacéutico en el programa nacional tarda, por lo general, de tres a cinco años, según Anthony Leachon, expresidente del Colegio de Médicos de Filipinas, pero el programa de vacunación contra el dengue comenzó de inmediato, en abril de 2016.

Al leer con detenimiento un informe provisional sobre los ensayos clínicos con Dengvaxia, redactado por investigadores de Sanofi Pasteur, la división de vacunas de Sanofi, Dans y Dans descubrieron nuevos motivos de preocupación. En niños asiáticos de entre dos y cinco años, los vacunados tenían una probabilidad hasta siete veces mayor que los no vacunados de acabar hospitalizados por dengue grave en los tres años posteriores. Un examen cuidadoso de los datos reveló que, si bien la vacuna resultaba más segura en los niños de más edad que la citada, desde un punto de vista estadístico no era posible descartar que Dengvaxia no empeorara las cosas en algunos de ellos.

En marzo de 2016, Dans y Dans y otros facultativos remitieron una carta a la entonces secretaria de sanidad Janette Garin, donde advertían que la vacuna podía ser peligrosa para algunos niños y que Filipinas no disponía de suficientes profesionales capacitados para vigilar los posibles efectos adversos en tal cantidad de niños. Se estaba investigando una vacuna que podía resultar más segura y, a su juicio, valía la pena esperar.

Sin embargo, aquel mismo mes el reputado grupo asesor en vacunas de la Organización Mundial de la Salud —que facilita normas a los países sobre políticas de vacunación— afirmaba en una circular informativa sobre Dengvaxia que, después de varios años de observaciones, la hospitalización de niños pequeños vacunados era irrelevante desde el punto de vista estadístico. Y añadía: «No se han detectado otras cuestiones relativas a la seguridad en ningún grupo de edad» por encima de los cinco años. Solo existía la «posibilidad teórica» de que la vacuna fuera peligrosa en algunos niños, lo que hacía necesarios nuevos estudios para que el comunicado no «pusiera en peligro la confianza de la población» en ella. Pese a lo anterior, «era conveniente su difusión como parte de un programa de vacunación sistemática

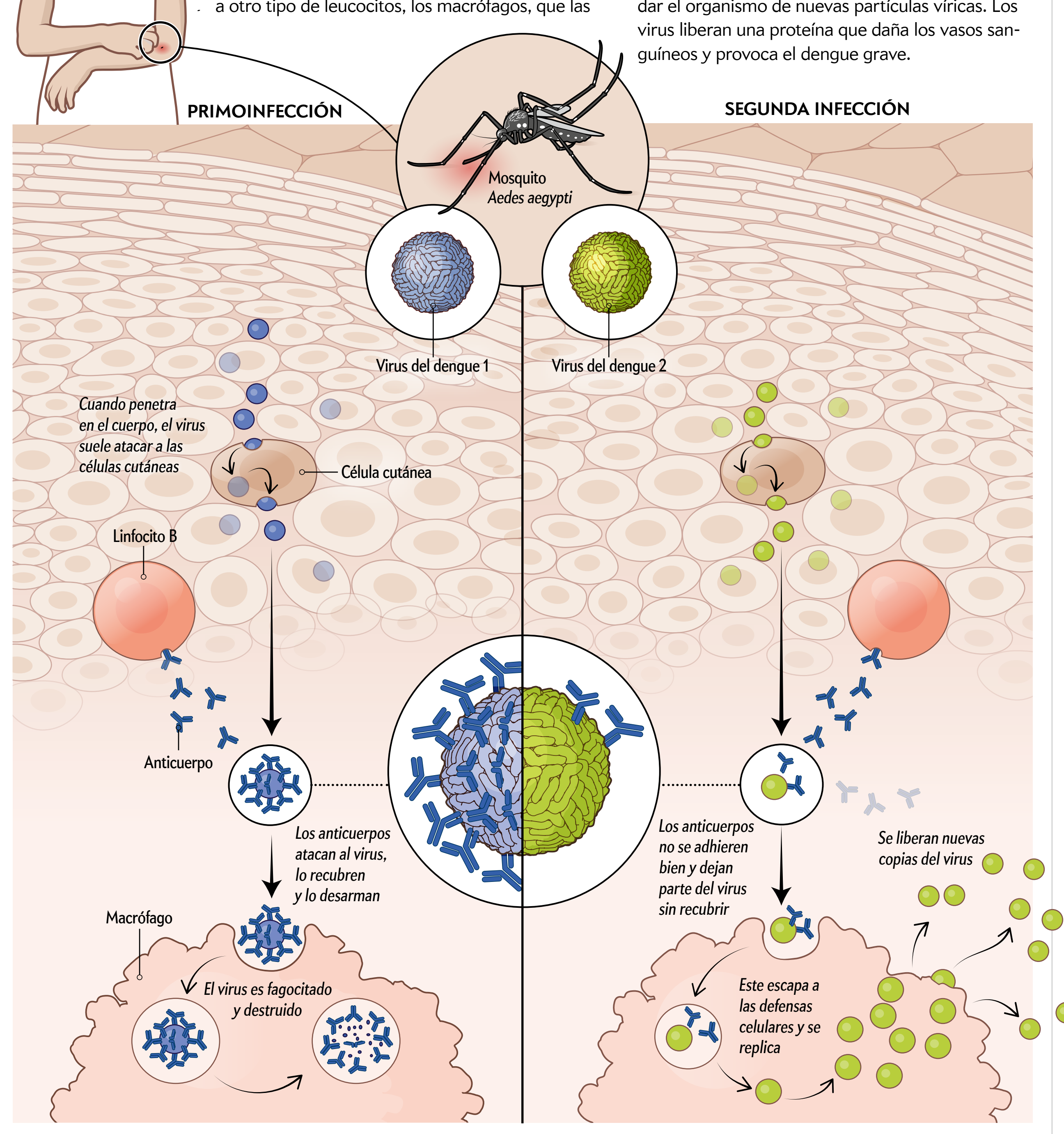
Días más tarde llegó la primera notificación de muerte después de la administración de la vacuna, la de un muchacho con cardiopatía congénita. Garin explicó en un comunicado de prensa que su fallecimiento no estaba relacionado con Dengvaxia. Sin embargo, Dans y Dans insistieron durante meses, hablando ante la prensa y difundiendo un breve vídeo en Facebook en el que advertían que si un niño no había padecido el dengue, la vacuna podía desencadenar una infección mortífera. Su razonamiento se fundamentaba en una teoría de hacía décadas, muy controvertida, denominada facilitación de la infección por anticuerpos (ADE, *antibody-dependent enhancement*). Garin replicó con una advertencia: los médicos que contribuyeran a la «desinformación» sobre Dengvaxia serían responsables de todas las muertes por dengue que pudieran haberse evitado con la vacuna.

La situación se mantuvo así hasta noviembre de 2017, cuando Sanofi Pasteur publicó su recomendación: las personas que nunca hubieran sufrido el dengue no debían recibir Dengvaxia. Un mes más tarde, la OMS emitía nuevas directrices, en las que aconsejaba que se administrara exclusivamente a sujetos con «antecedentes probados de infección por el dengue». Filipinas suspendió el programa de vacunación aquel mismo diciembre, cuando los padres y la prensa replicaron con protestas, recriminaciones y más noticias sobre la muerte de niños. Más de 830.000 escolares habían sido vacunados. Según el Ministerio de Sanidad, hasta septiembre de 2018 habían muerto 154 niños vacunados a causa de afecciones diversas. La gran mayoría de los decesos no guardaba relación con la vacuna, pero la observación

PAOLO HARRIS PAZ (1 y 2)

Cómo pueden los anticuerpos agravar el dengue

El dengue está causado por cuatro virus emparentados, transmitidos por mosquitos del género *Aedes*. La teoría de la facilitación de la infección por anticuerpos, postulada en la década de 1970 por Scott B. Halstead, intenta explicar por qué una segunda infección, causada por otra variedad distinta del virus, es más mortífera que la primera. La primoinfección por el virus del dengue 1, por ejemplo, estimula en los linfocitos B la secreción de anticuerpos que recubren las partículas víricas y atraen a otro tipo de leucocitos, los macrófagos, que las fagocitan y destruyen. Neutralizado el intruso, los linfocitos B entran en latencia y solo se volverán a activar si se desata una segunda infección, contra la cual secretarán los mismos anticuerpos. Pero los anticuerpos contra el virus del dengue 1 no se fijan bien a otras variedades del virus, por ejemplo, la 2. Los anticuerpos siguen delatando al intruso ante los macrófagos, pero de un modo distinto que permite a este eludir la destrucción y adueñarse de los macrófagos y de su maquinaria celular para inundar el organismo de nuevas partículas víricas. Los virus liberan una proteína que daña los vasos sanguíneos y provoca el dengue grave.



clínica o los análisis de sangre confirmaron que 19 habían sido causados por el dengue.

Sanofi Pasteur sostiene que las muertes en Filipinas pudieron deberse a la incapacidad de la vacuna para inmunizar a una pequeña parte de los vacunados. En cambio, algunos expertos afirman, como ya lo habían hecho Dans y Dans, que Dengvaxia desata algo parecido a una primera infección por el dengue, lo que predispondría al organismo a responder de forma peligrosa a una segunda infección por el virus.

La controversia no ha frenado el lanzamiento de Dengvaxia, que en la actualidad está autorizada en más de 20 países. En octubre de 2018, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) de Estados Unidos anunció que concedería prioridad a la revisión de la solicitud de comercialización de Sanofi Pasteur, de cara a la aprobación de Dengvaxia. Esto significa que en ese país podría ser autorizado su uso en zonas en que el dengue es endémico, como Puerto Rico, antes de que Filipinas concluyera su investigación sobre las muertes de niños vacunados y de que Sanofi Pasteur publicase el informe definitivo de los ensayos clínicos, de seis años de duración.

UNA ENFERMEDAD DESCONCERTANTE

En la mayoría de las infecciones víricas, como el sarampión, un segundo episodio de la enfermedad resulta mucho más leve que el primero. En cambio, en el dengue es mucho más probable que devenga en mortal. Investigadores y médicos llevan años intentando averiguar el porqué. En las décadas de 1950 y 1960, cuando las epidemias de la forma grave comenzaron a surgir en Asia, se preguntaron si sería una infección totalmente nueva. Hasta entonces, el dengue solía mantener al enfermo agotado y encamado, pero el nuevo cuadro clínico lo mandaba al hospital o a la tumba. ¿Había mutado el virus? ¿O había que culpar al sistema inmunitario?

Un médico joven, recién salido de la facultad, decidió buscar una respuesta. En 1957, Scott B. Halstead empezó a estudiar los virus transmitidos por mosquitos mientras trabajaba para el Ejército estadounidense en Japón. Cuatro años más tarde, tuvo que hacer frente a su primer brote importante de dengue cuando estaba destinado en un laboratorio militar contiguo al Hospital Infantil de Bangkok. Los médicos pensaban que los jóvenes ingresados padecían un envenenamiento; casi una cuarta parte falleció. Halstead dirigía el equipo que señaló al dengue como la causa del brote y, perseverando en sus investigaciones, hizo un segundo descubrimiento más desconcertante. Los niños afectados por segunda vez —por una variedad del virus distinta de la primera— y los recién nacidos de madres que habían adquirido inmunidad contra el dengue estaban más expuestos a sufrir un cuadro grave y fallecer. Nadie sabía el motivo.

En 1964, R. A. Hawkes, por entonces investigador en la Universidad Nacional Australiana en Canberra, descubrió que los virus de la encefalitis del Valle de Murray, del Nilo Occidental, de la encefalitis japonesa o de Getah infectaban más células cultivadas si antes de su inoculación las partículas víricas se mezclaban con anticuerpos. Hawkes propuso que estos estabilizaban el virus y reforzaban su capacidad para atacar a las células. Por su parte, Halstead se preguntaba si algo parecido sucedería con el dengue.

Para descubrir por qué eran precisas dos infecciones por serotipos distintos para que la segunda fuera mortal, Halstead infectó a 118 monos con diversas combinaciones de los cuatro virus del dengue y determinó la cantidad presente en su sangre (viremia). En 1973, publicó sus resultados: algunos primates, infectados por segunda vez con otra variedad del virus, presentaban una viremia mucho mayor. Al cabo de cuatro años dio a conocer su hipótesis, que denominó facilitación de la infección por anticuerpos.

Explicó que la primoinfección la provocó con el virus del serotipo DENV-1. Los anticuerpos frente a esa variedad persisten en la sangre durante décadas o incluso toda la vida. Y cuando el individuo es infectado una segunda vez por otro virus del dengue, el DENV-2, 3 o 4, los anticuerpos contra el DENV-1 acelerarían paradójicamente la multiplicación del segundo en las células infectadas, desatando una infección galopante que podría causar la muerte.

Desde entonces, Halstead y otros investigadores han refinado la hipótesis de la ADE, cuyo mecanismo sería el siguiente: el virus del dengue consta de una hebra de ácido ribonucleico (ARN) envuelta por una cápside proteica provista de una serie de protuberancias características en la superficie. Durante la primoinfección, los linfocitos B del sistema inmunitario sintetizan un anticuerpo denominado inmunoglobulina G (IgG) que se fija a una o más de esas espinas. Al adherirse, los anticuerpos delatan el virus a otras células inmunitarias: los macrófagos. El término «fago» proviene de la palabra griega que significa «comer», por lo que un macrófago es literalmente un «comedor grande». Engullen el virus y lo digieren con sus enzimas, pero para ello ha de quedar marcado por los anticuerpos.

Cuando la infección remite, una parte de los linfocitos B secretores de anticuerpos entra en latencia. Si otro virus del dengue desata una segunda infección, despiertan y producen los mismos anticuerpos que antes. Halstead postuló que algunos de esos anticuerpos son capaces de adherirse a la superficie de los virus extraños, pero a menudo no logran bloquear la mayor parte de las espinas letales (sus «espoletas», por así decirlo). Los anticuerpos presentan el intruso a los macrófagos, pero sin haberlo desarmado antes. Y este neutraliza el sistema defensivo del macrófago, se apodera de él y emplea los recursos celulares para producir copias de sí mismo. La colaboración involuntaria del anticuerpo permite que el virus de la nueva variedad produzca 1000 veces más copias que si actuara solo.

Halstead recuerda que el «reconocimiento» por haber planteado la hipótesis de la ADE fue una mezcla de indiferencia e incredulidad por parte de sus colegas. A sus 89 años, hoy es profesor adjunto en la Universidad de Ciencias de la Salud de los Servicios Uniformados, en Bethesda (Maryland), donde sigue defendiendo su punto de vista. Numerosos expertos en el dengue lo consideran el padre de la ADE. «Entonces pensé que mi descubrimiento era de gran importancia, pero nadie quiso creer que fuera real», lamenta.

Más de cuatro décadas después, uno de esos expertos, Eva Harris, de la Universidad de California en Berkeley, halló pruebas de peso de que la ADE no solo era real, sino que contribuía al dengue grave infantil. No pretendía corroborarlo ni refutarlo: al principio, se mostró escéptica respecto al fenómeno y nada entusiasta de enzarzarse en un debate de décadas. Su equipo, que contaba con Leah Katzelnick, especialista en modelos estadísticos, estudiaba los mecanismos con los que el dengue enferma a los niños. Esto les condujo a colaborar en la creación de un laboratorio en Nicaragua y a emprender uno de sus proyectos más ambiciosos: un estudio de cohortes pediátricas a largo plazo. En Managua, Harris y sus colaboradores asumieron la nada fácil tarea de hacer el seguimiento a miles de niños.

Durante más de 15 años, los científicos del ensayo atendieron a los niños que enfermaban e iban a su casa a tomar

datos y muestras de sangre. De los 6684 participantes, 618 contrajeron el dengue, unos 48 en su forma grave. Gracias al examen de más de 41.000 muestras de sangre, obtenidas a lo largo de más de 12 años, hicieron un descubrimiento sorprendente. Los portadores de una concentración concreta de anticuerpos —ni lo bastante baja como para ser inútil, ni lo bastante alta como para inmunizar, sino con valores intermedios— multiplicaban casi por ocho el riesgo de padecer la fiebre hemorrágica o el síndrome de choque por dengue.

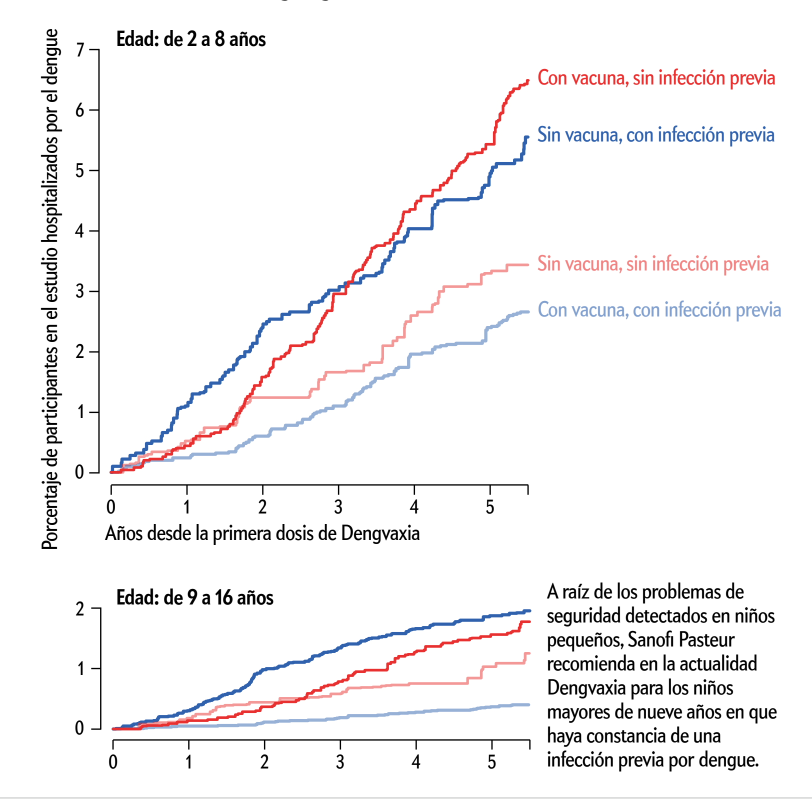
La ADE explica con facilidad ese hallazgo. Si los anticuerpos no están presentes desde el inicio o lo están en muy bajo número, no pueden amplificar la infección posterior y desencadenar el cuadro grave. En cambio, si están presentes en abundancia, como sucede poco después de la primoinfección, recubren lo suficiente el nuevo virus, que acabará siendo destruido por los macrófagos. Ahora bien, si los anticuerpos están presentes en una concentración intermedia (cuyo valor cae en lo que Harris denomina la «zona de peligro») facilitan la penetración del virus sin desarmar en los macrófagos, de manera que promueven su multiplicación.

El artículo publicado por Harris en *Science*, donde describía esos resultados, era, en palabras de Jean Lim, virólogo de la Facultad de Medicina de Mount Sinai, un «estudio como pocos» que convenció a algunos de los más firmes detractores de la ADE. Es posible que sus hallazgos inesperados hayan dado también con la solución al misterio de la vacuna del dengue.

EPIDEMIOLOGÍA

¿Es segura Dengvaxia?

Los investigadores de Sanofi Pasteur diseñaron una nueva prueba para saber qué niños participantes en sus ensayos clínicos con Dengvaxia, la primera vacuna autorizada contra el dengue, habían padecido una infección por dengue antes de ser vacunados. Observaron que si se había padecido antes la infección (*azul*), la vacuna era muy eficaz contra las formas graves del dengue que exigen la hospitalización. En cambio, si el niño no presentaba signos de una infección anterior (*rojo*), tenía muchas más posibilidades que los no vacunados de su misma edad de acabar hospitalizado por dengue grave, años después de la vacunación. El efecto era mucho más acusado en los niños más pequeños (*gráfica superior*), que tenían más probabilidad que los de más edad (*gráfica inferior*) de sufrir de entrada el dengue grave.



A raíz de los problemas de seguridad detectados en niños pequeños, Sanofi Pasteur recomienda en la actualidad Dengvaxia para los niños mayores de nueve años en que haya constancia de una infección previa por dengue.

FUENTE: «EFFECT OF DENGUE SEROSTATUS ON DENGUE VACCINE SAFETY AND EFFICACY», POR SARANYA SRIDHAR ET AL., EN *NEW ENGLAND JOURNAL OF MEDICINE*, VOL. 379, N.º 4, 26 DE JULIO DE 2018; AMANDA MONTAÑEZ (*gráficos*)

UNA SEÑAL DE ALARMA

Casualmente, días después de la aparición del artículo de Harris, en noviembre de 2017, Sanofi Pasteur hizo el anuncio que desató las protestas airadas de los padres y madres filipinos: si un niño no ha contraído el dengue antes, no debe recibir Dengvaxia. Un mes más tarde, la OMS lo secundó y manifestó que solo debían ser vacunadas las personas que lo hubieran padecido.

Eso era exactamente lo que Halstead había estado predicando desde marzo de 2016, cuando publicó un análisis en la revista *Vaccine* en el que sostenía que Dengvaxia podía ser problemática. En las personas que no hubieran contraído el dengue, la vacuna actuaría como la primoinfección del virus y sensibilizaría al organismo con la cantidad adecuada de anticuerpos que, como un caballo de Troya, facilitarían que la infección real desatara un cuadro grave. La probabilidad de que un niño de corta edad contraiga la enfermedad antes de recibir la vacuna es menor, por lo que tiene más posibilidades de que esta actúe como una primoinfección en su caso. Asimismo, el riesgo de que padezca una de las formas graves a raíz de una segunda infección es mayor que el de un adulto (como Halstead y otros comprobaron cuando un segundo virus del dengue se propagó en Cuba en 1981). El problema estribaba en que no era fácil saber qué niños no habían padecido el dengue antes de recibir Dengvaxia, porque Sanofi Pasteur no había recogido ese dato de todos antes de vacunarlos.

Harris asegura: «No me gusta apelar al "ya os lo dije", pero lo presagiábamos.» En el curso de reuniones y de largas conferencias telefónicas, había advertido a los investigadores de Sanofi Pasteur de que no estaban recabando el tipo de datos que podían indicar si la vacuna entrañaba un riesgo inaceptable. En lugar de analizar si todos los niños participantes habían sufrido la infección antes de recibir Dengvaxia, solo lo hicieron en un 10 al 20 por ciento de ellos. La farmacéutica argumenta que se aventuraba en un territorio inexplorado armada con los mejores protocolos en vacunología. «En muchos ensayos con vacunas es habitual que solo se extraigan muestras de sangre a entre el 10 y el 20 por ciento de los participantes», afirma Su-Peing Ng, directora médica internacional de Sanofi Pasteur.

Cuando salió a la luz la alarmante tasa de hospitalizaciones, no hubo posibilidad de dar marcha atrás y extraer muestras a los miles de niños inscritos en los ensayos clínicos, a fin de averiguar si antes de la vacunación habían estado expuestos al dengue. Era demasiado tarde, puesto que ya habían sido vacunados. Sanofi Pasteur trabajaba con la Universidad de Pittsburgh en un nuevo método de análisis que permitiría detectar esa infección previa en los niños vacunados. En esa reevaluación se basó la advertencia de la farmacéutica emitida en noviembre de 2017, de que solo se administrara Dengvaxia a los que ya hubieran padecido el dengue.

Las recomendaciones precedentes se habían basado en los hallazgos preliminares de los ensayos clínicos, en virtud de los cuales Dengvaxia era más segura en los niños de mayor edad. Sin embargo, como revelaban los nuevos análisis, la edad era un indicador parcial de la infección previa por dengue. Es más probable que un niño de nueve años haya padecido ya la infección que otro más pequeño, en especial en los lugares en que esta es endémica, por lo que la administración de la vacuna al primero sería, en promedio, segura. Pero ni la edad ni el carácter endémico de la enfermedad son métodos infalibles para saber si un niño la ha padecido; la única manera cierta es un análisis de sangre. Y como subraya Halstead: «Siempre habrá niños de nueve años que no la hayan sufrido».

Halstead había puesto públicamente en conocimiento de la OMS su preocupación. En un artículo publicado en diciembre de 2016 en *Journal of Infectious Diseases,* alertaba de que una afirmación del principal grupo asesor sobre vacunas de la OMS era errónea. Se había dicho que el riesgo de hospitalización de los niños de dos a cinco años era máximo el tercer año después de la vacunación y que luego «desaparecía». Halstead adujo que los resultados a largo plazo de los ensayos clínicos de Sanofi Pasteur refutaban semejante aseveración. Según Dans, Dans y otros, en un análisis independiente de los datos de los ensayos clínicos que vio la luz en el *Journal of Clinical Epidemiology* se concluía que «no existía una base biológica para establecer los 9 años» como la edad a partir de la cual Dengvaxia se podía considerar segura.

Pese a todo, la OMS mantiene su decisión de aconsejar la vacuna en los niños mayores que vivan en los países más castigados por el dengue. «La revisión fue minuciosa, transparente y acorde con nuestros procedimientos publicados», argumenta Joachim Hombach, asesor sanitario del departamento de vacunación, vacunas y productos biológicos de la OMS. «Se barajaron varias opciones en cuanto a las recomendaciones y la publicada en 2016 constituye la postura consensuada del comité asesor.»

LA CONTROVERSIA CONTINÚA

Sanofi Pasteur publicó en *New England Journal of Medicine* un nuevo análisis de los datos de su ensayo clínico en julio de 2018, esta vez con el método de Pittsburgh. La revisión confirmó el riesgo más alto de enfermedad grave y hospitalización en los niños seronegativos (sin indicios en la sangre de infección previa por el dengue) que habían recibido la vacuna, en comparación con los no vacunados. Hacían constar que «la vacuna recrea, en parte, una primoinfección y aumenta el riesgo de dengue grave si tiene lugar un segundo contacto con el virus». Aunque los defensores de la hipótesis de la ADE habían previsto este hecho, en el artículo se decía que los «mecanismos inmunopatogénicos subyacentes a estos hallazgos siguen siendo desconocidos».

Halstead sostiene que los investigadores de Sanofi Pasteur se niegan a aceptar las pruebas de sus propios ensayos. Ng replica que aún no se ha demostrado con exactitud de qué modo la ADE agrava la infección en el ser humano y lo califica «más bien como una observación de laboratorio, una observación in vitro. No está clínicamente demostrado. No sabemos si el mecanismo que hay detrás es la ADE o no», afirma la directora. Asegura que el impacto general de Dengvaxia en la salud pública sigue siendo beneficioso. Según Sanofi Pasteur, en niños de nueve años en adelante que hayan padecido el dengue, la vacuna reduce la incidencia de su forma grave y el ingreso hospitalario en cerca de un 80 por ciento. (Por motivos todavía no aclarados, dos episodios de dengue confieren inmunidad de por vida. En rigor, pues, la vacuna solo es útil para las personas que han sufrido un episodio, pero no dos.)

Ng no es la única que duda de que la ADE sea el principal mecanismo detrás del dengue potencialmente mortal. Duane Gubler, director fundador de la división del dengue de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EE.UU. (CDC) y profesor emérito del Programa de Enfermedades Infecciosas Emergentes en la Facultad de Medicina Duke-NUS de Singapur, sostiene que el DENV-2 y el DENV-3 se han asociado a lo largo de la historia con brotes de la forma grave. Así que el serotipo del virus podría ser al menos tan importante como la ADE para determinar la evolución de la infección. Según Alan Rothman, catedrático de biología celular y molecular en la Universidad de Rhode Island, los linfocitos T, que atraen y activan a los macrófagos y secretan sustancias inflamatorias, intervienen de forma más directa en la aparición del cuadro grave que los anticuerpos. En cambio, Halstead considera que los linfocitos T son fundamentalmente salvadores. Afirma que destruyen los macrófagos infectados, momento en que el virus libera una proteína que daña los vasos sanguíneos. Aun así, es posible salvar al paciente manteniendo su hidratación y, de ese modo, ganar tiempo para que los linfocitos T aniquilen el virus.

HACIA UNA VACUNA MÁS SEGURA

Con casi un millón de personas infectadas cada día y su aparición en lugares donde era desconocido, una vacuna segura contra el dengue es más urgente que nunca. Basándose en los últimos datos de Sanofi Pasteur, los artífices de la nueva vacuna afirman estar haciendo las cosas de otro modo. «El diseño de nuestro ensayo pretende responder a la pregunta fundamental: ¿cómo actúa la vacuna en los que no han padecido el dengue antes?», plantea Rajeev Venkayya, presidente de la Unidad de Negocio Internacional de Vacunas de la farmacéutica Takeda. En la actualidad, Takeda está ensayando su vacuna contra el dengue en niños de cuatro a 16 años, en Latinoamérica y Asia. «Cuando iniciamos este ensayo en 2016, éramos conscientes de la preocupación que suscita la cuestión de las personas no infectadas. Así que nos aseguramos de contar con ellas en el ensayo y de recoger muestras iniciales de sangre de todos y cada uno de los participantes», asegura Venkayya. En enero de 2019, la farmacéutica anunció resultados preliminares de sus ensayos clínicos: la vacuna era eficaz. Pero, sin duda, una evaluación exhaustiva de la seguridad se demorará más tiempo.

Al menos hay otras dos vacunas contra el dengue en desarrollo: una de los Institutos Nacionales de la Salud (NIH) de EE.UU. y otra de *GlaxoSmithKline*. Pasarán años antes de que se demuestre que son seguras y eficaces y, eventualmente, reciban la autorización de comercialización. Gubler afirma que probablemente cualquier vacuna será eficaz contra un par de serotipos del virus, pero no tanto contra los otros. Y de ser así, añade: «Siempre existirá el riesgo de ADE. Por tanto, ¿qué



EN FILIPINAS, niños vacunados y sus padres se manifiestan en contra del programa de vacunación 2016-2017 contra el dengue.

BULIT MARQUEZ, AP PHOTO

hacer? ¿Utilizamos esas vacunas, o las guardamos y esperamos otros 50 años hasta disponer de una que sea perfecta?» Halstead se muestra mucho más optimista: «Existe una realmente buena», la de los NIH, que «cumple casi todos los objetivos necesarios para que la eficacia y la seguridad constatadas en la fase preclínica queden confirmadas en los seres humanos», escribió en un artículo, si bien restan pendientes ensayos clínicos extensos.

El anuncio de la FDA, en octubre de 2018, de que iba a agilizar la revisión de Dengvaxia ha añadido nueva urgencia a este debate. El dengue en EE. UU. afecta a territorios como Guam, las Islas Vírgenes, Samoa o Puerto Rico, donde Gubler ejerció como director de la división de los CDC para esta enfermedad. Él apoya la aplicación de la vacuna en lugares como Puerto Rico, donde el sistema de vigilancia del dengue es mucho más sólido que en Filipinas. Eso significa que los médicos serían capaces de supervisar a las personas vacunadas y de garantizar su rápido ingreso si surgieran signos graves. Y añade: «Abogo por administrar la vacuna sin ensayos preliminares en zonas con alta carga endémica, pues creo que con una buena supervisión médica y el tratamiento de los casos, el riesgo de ADE es mínimo».

Halstead discrepa: «Fuera de las personas con seropositividad comprobada, es un producto peligroso». Pero el demostrar esa infección previa exige pruebas de laboratorio, que no siempre están disponibles en muchas partes del mundo afectadas por las epidemias de dengue. Con polémica, la OMS advirtió en septiembre de 2018 que, si bien sería preferible saber si se ha padecido la infección antes, cuando tales pruebas no sean factibles, los países podrían optar por la administración de Dengvaxia en niños de al menos 9 años en aquellas poblaciones cuyo grado de incidencia (endemicidad) sea igual o superior al 80 por ciento. Instado a explicar la justificación ética de esta recomendación, Hombach afirmó que la OMS había sopesado cuidadosamente los pros y los contras; también había constatado que una campaña de este tipo debería ir acompañada de una «divulgación exhaustiva de los riesgos asociados a la vacunación en personas sin un estado sérico conocido». No obstante, la comprensión de cuestiones tan complejas, en países con diversidad étnica, podría suponer un problema, pues muchas personas pueden no entender la lengua en que hablan los funcionarios de sanidad, ni ser capaces de leer las hojas informativas. Sanofi Pasteur adopta una actitud más prudente. En palabras de Karen Batoosingh, portavoz de la empresa: «La vacuna debería estar a disposición de las personas con antecedentes de infección para evitar nuevas infecciones» y añade que se afanan por elaborar «un nuevo método de análisis rápido para el dengue que garantice un acceso más amplio a la vacuna a todos aquellos susceptibles de beneficiarse de su efecto protector».

PÉRDIDA DE CONFIANZA

Las repercusiones del programa de vacunación aún están candentes en Filipinas. Ante una comisión de investigación del Senado, Aquino explicó que la incidencia del dengue en el país ha aumentado hasta cotas alarmantes y esperaba que Dengvaxia evitaría que el virus irrumpiera en las zonas urbanas densamente pobladas. Sin embargo, el pasado mes de febrero, tanto el Senado como el Congreso de Filipinas recomendaron que, en virtud de una ley anticorrupción, Aquino, Garin y otros funcionarios de alto rango sean imputados de irregularidades en el suministro y la administración de la vacuna. Las familias de unos 36 niños fallecidos han incoado causas penales contra Garin y otros funcionarios filipinos, acusándolos de imprudencia temeraria con resultado de homicidio y tortura. (Enrique Domingo, el subsecretario de Sanidad, declaró que había asumido el cargo en diciembre de 2017, una vez desatado el escándalo y que no conocía de primera mano lo sucedido cuando se le interpeló acerca de las circunstancias en que se implementó la campaña de vacunación.)

En medio del miedo y la sospecha, en Filipinas se han producido varios brotes de sarampión. En febrero, se informó de que

más de 8400 personas habían enfermado, de las cuales más de 130 habían fallecido. Los padres y madres habían tenido miedo de vacunar a sus hijos. Según un estudio realizado en 2018 por el Proyecto de Confianza en las Vacunas, con sede en Londres, menos de una tercera parte de los filipinos están convencidos de que las vacunas sean importantes, en tanto que en 2015 el porcentaje alcanzaba el 93 por ciento. En ese estudio, publicado en la revista *Human Vaccines and Immunotherapeutics,* Heidi Larson, directora del proyecto, y sus colaboradores sostenían que «una campaña publicitaria sesgada en los medios de comunicación» —en particular, «informaciones falsas tendentes a vilipendiar a las autoridades, los científicos y los organismos reguladores» e «indagaciones de corte inquisitorial por parte del Senado y del Congreso»— habían desatado el pánico en la opinión pública y la desconfianza hacia las vacunas. Dans, Dans, Halstead y otros replicaron conjuntamente que diversos factores habían contribuido a esa pérdida de confianza, en particular las afirmaciones «exageradas» de Sanofi sobre la seguridad de Dengvaxia: «La indignación fue más el resultado que la causa de la desconfianza».

Preguntado por esta revista si estaba proporcionando munición a los detractores de las vacunas, Halstead respondió que había sido cofundador de la Iniciativa para la Vacunación Infantil en la década de 1990, que más tarde se transformó en La Alianza Mundial para Vacunas e Inmunización (GAVI), una asociación público-privada internacional que lucha para mejorar el acceso a las vacunas de los niños de países pobres. «Mi honestidad como partidario de las vacunas y de la vacunación queda fuera de toda duda», contesta.

Según Antonio Dans, a pesar de la lucha de los científicos, los padres de los niños vacunados pasan las noches en vela. «Las madres están en verdad angustiadas, y piensan: “¿Era mi hijo seronegativo cuando lo vacunaron? ¿Por qué no nos dijeron que podía ser peligroso?”». Y relata: «Nos llaman para preguntar: “Mi hijo tiene tos, ¿debo ir al hospital? Me parece que tiene unas décimas, ¿lo puedo llevar a la escuela?”». «¿Y cómo se vigila un resfriado y la fiebre en casi un millón de niños y se averigua si se trata o no de dengue? Desde el punto de vista asistencial es una pesadilla, por eso lo estábamos advirtiendo al Ministerio de Sanidad.» Y añade: «De casi todas las muertes acaecidas en el grupo de vacunados se culpa a Dengvaxia, aunque claramente no guarden relación. Gran parte de esa rabia y desconcierto se podría haber evitado con un asesoramiento científico veraz y oportuno por parte de unas autoridades fidedignas. Así pues, lo triste es que la OMS aumente la confusión», concluye Dans.

Lo que le preocupa a Halstead es que, a medida que la concentración de anticuerpos en los seronegativos vacunados disminuya con el tiempo, hasta un nivel intermedio en el que sea más probable la ADE, estos serán cada vez más proclives a contraer el dengue grave si sufren una infección real. Con las cifras de los ensayos clínicos de Sanofi Pasteur en la mano, según las cuales, cinco de cada 1000 niños seronegativos vacunados acabaron hospitalizados por el dengue, de los que dos presentaron la forma grave, Halstead calcula que más de 4000 podrían ser hospitalizados en Filipinas por dengue potenciado por la vacuna. «Me froto los ojos y no doy crédito a lo que sucede. ¿Por qué Sanofi no dedica tiempo a pensar: “Bien, ahora que hemos sensibilizado a tanta gente [sobre la ADE], qué hacemos para protegerlos?”», dice. A esta pregunta, Ng respondió que no estaba claro si los casos de dengue grave en el grupo vacunado se debían a un fallo de la vacuna o a la ADE. Todos los pacientes, con independencia de si han padecido o no el dengue antes, o de si han sido vacunados o no, deberían protegerse contra las picaduras de los mosquitos, permanecer atentos a los signos iniciales de la enfermedad y buscar asistencia médica sin demora ante los indicios de un cuadro grave. Preguntado sobre cuándo se publicaría el informe final de los ensayos clínicos, Sanofi Pasteur respondió que los resultados se habían dado a conocer a finales de 2018, a través de un póster en una reunión de la Sociedad Americana de Medicina Tropical e Higiene.

Las vacunas han salvado incontables vidas. La viruela ha desaparecido de la faz de la Tierra y la poliomielitis casi ha sido derrotada; el tétanos y la rabia ya no infunden terror. A pesar de estos logros, el miedo de la población a las vacunas ha crecido y expone a millones de niños a enfermedades evitables. El creciente escepticismo generado en torno a ellas responde casi enteramente a la desinformación. Aun así, las vicisitudes de la historia de Dengvaxia complican el argumentario sensato de los científicos valientes, que luchan contra el desconocimiento y los prejuicios, en aras de la seguridad de todos.

El caso del dengue plantea preguntas espinosas acerca de cómo las compañías farmacéuticas y las autoridades sanitarias deberían proceder en el contexto de un conocimiento científico en evolución y de vacunas imperfectas. ¿Es lícito exponer a riesgos a una minoría para proteger a la mayoría, como implica la nota oficial de la OMS de septiembre de 2018 sobre Dengvaxia? ¿Quién debería tomar tan difíciles decisiones: grupos internacionales de expertos, las autoridades sanitarias nacionales, los padres y médicos informados o una combinación de todos? ¿Y quién debería asumir la responsabilidad si las cosas van mal? IyC

PARA SABER MÁS

Dengue. Scott B. Halstead, ed. en *Tropical Medicine: Science and Practice*, vol. 5. Imperial College Press, 2008.

Dengue antibody-dependent enhancement: Knowns and unknowns. Scott B. Halstead en *Microbiology Spectrum,* vol. 2, n.° 6, art. n.° 0022-2014, Diciembre 2014.

Effect of dengue serostatus on dengue vaccine safety and efficacy. Saranya Sridhar et al. en *New England Journal of Medicine,* vol. 379, n.° 4, págs. 327-340, 26 de julio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

El dengue en Latinoamérica. Jorge R. Rey y L. Philip Lounibos en *IyC*, enero de 2012.

Freno al dengue. Scott O'Neill en *IyC*, agosto de 2015.

La lucha contra los mosquitos. Dan Strickman en *IyC*, septiembre de 2018.

LA TE
Y ELE



FISIOLOGÍA ANIMAL

Nuevos estudios revelan aspectos sorprendentes sobre la fisiología y el comportamiento del gimnoto

Kenneth C. Catania

Fotografía de David Liittschwager

EL GIMNOTO (*Electrophorus electricus*) **esgrime su extraordinaria facultad como arma ofensiva y defensiva.**

MIBLE
CTRIZANTE
ANGUILA



Kenneth C. Catania imparte biología en la Universidad Vanderbilt. Su campo de investigación es la neurobiología comparativa, sobre todo de los sistemas sensoriales animales. Este es su cuarto artículo para *Investigación y Ciencia*.



No es ningún secreto que el gimnoto, o anguila eléctrica, aturde a sus presas, pues hace siglos que conocemos testimonios al respecto. Pero a menos que uno sea agente de seguridad en la nave estelar *Enterprise*, el verbo «aturdir» resulta vago. ¿Qué ocurre en realidad cuando ataca? Hasta hace poco, la biología ignoraba casi todo sobre esa facultad extraordinaria. No entraba en mis planes estudiar el fenómeno, y nunca hubiera imaginado que en nombre de la ciencia acabaría ofreciendo mi brazo a uno de ellos. Pero como profesor de biología en la Universidad Vanderbilt que imparte enseñanzas sobre los peces eléctricos y que, con ese fin, toma fotografías y rueda películas a cámara lenta de gimnotos en el laboratorio para el aula, observé algo tan extraño que tuve que abandonar mis demás ocupaciones para indagar en ello.

Cuando una anguila propina una potente descarga eléctrica con la intención de devorar un pez, los peces de las inmediaciones quedan paralizados en apenas tres milisegundos. Quedan como petrificados, flotando inmóviles en el acuario. En un principio pensé que tal vez morían sin más. Pero cuando el cazador erraba el blanco y cesaba la descarga de alto voltaje, los peces recuperaban la movilidad y huían veloces: el efecto era temporal. No cabía en mi asombro, y me propuse averiguar cómo se desarrollaba el ataque eléctrico.

La analogía obvia que me vino a la cabeza fue la pistola táser de la policía, la cual paraliza el cuerpo al interferir con la capacidad del sistema nervioso para controlar la musculatura. Por medio de unos cables, transmite la corriente bajo la forma de breves impulsos de alto voltaje, a razón de 19 por segundo. El gimnoto no precisa de cables, pues el agua conduce la electricidad, como se puede comprobar cuando cae un secador en la bañera. Aparte de eso, su descarga recuerda a la de la pistola: impulsos breves, de apenas dos milisegundos. Ahora bien, llega a emitir más de 400 por segundo en el curso de un ataque, una cadencia muy superior. ¿Sería el gimnoto una verdadera pistola eléctrica acuática?

Con esta pregunta en mente, me embarqué en lo que acabó convirtiéndose en una misión de tres años para desvelar el mecanismo de ataque y los efectos que las descargas ejercen sobre las presas y los depredadores. A cada paso me sorprendió la complejidad de la que hace gala cuando emplea la electricidad, un recordatorio de que las invenciones humanas languidecen al lado de las de la naturaleza.

SORPRESAS EN ABUNDANCIA

Quizá sorprenda saber que el gimnoto no es una auténtica anguila, pues pertenece a una familia de peces originaria de Sudamérica, los gimnótidos (*Gymnotidae*). Los demás miembros del grupo emiten campos eléctricos sumamente débiles con fines sensoriales y comunicativos. El gimnoto ha amplificado su potencia en el curso de la evolución, por lo que es capaz de generar descargas de 600 voltios gracias al órgano eléctrico que recorre casi todo su cuerpo, de hasta 2,5 metros de largo y más de 18 kilogramos de peso. El órgano está compuesto por miles de células discoidales especializadas llamadas electrocitos, que actúan como pilas acumuladoras.

Para averiguar si paralizaba a sus presas como la pistola, necesitaba observarlo en actitud de caza. Así que ideé un experimento que aprovechaba su voraz apetito por las lombrices de tierra. Primero introduje un pez muerto con los nervios y músculos aún funcionales en el acuario, pero separado por una barrera conductora de la electricidad y unido por un cable a un aparato medidor de las contracciones musculares. Acto seguido, di lombrices a la anguila, que comenzó a electrocutarlas y a devorarlas con fruición. Con este montaje emprendí una serie de experimentos sobre la respuesta muscular de los demás peces a los impulsos de alto voltaje que emite cuando caza.

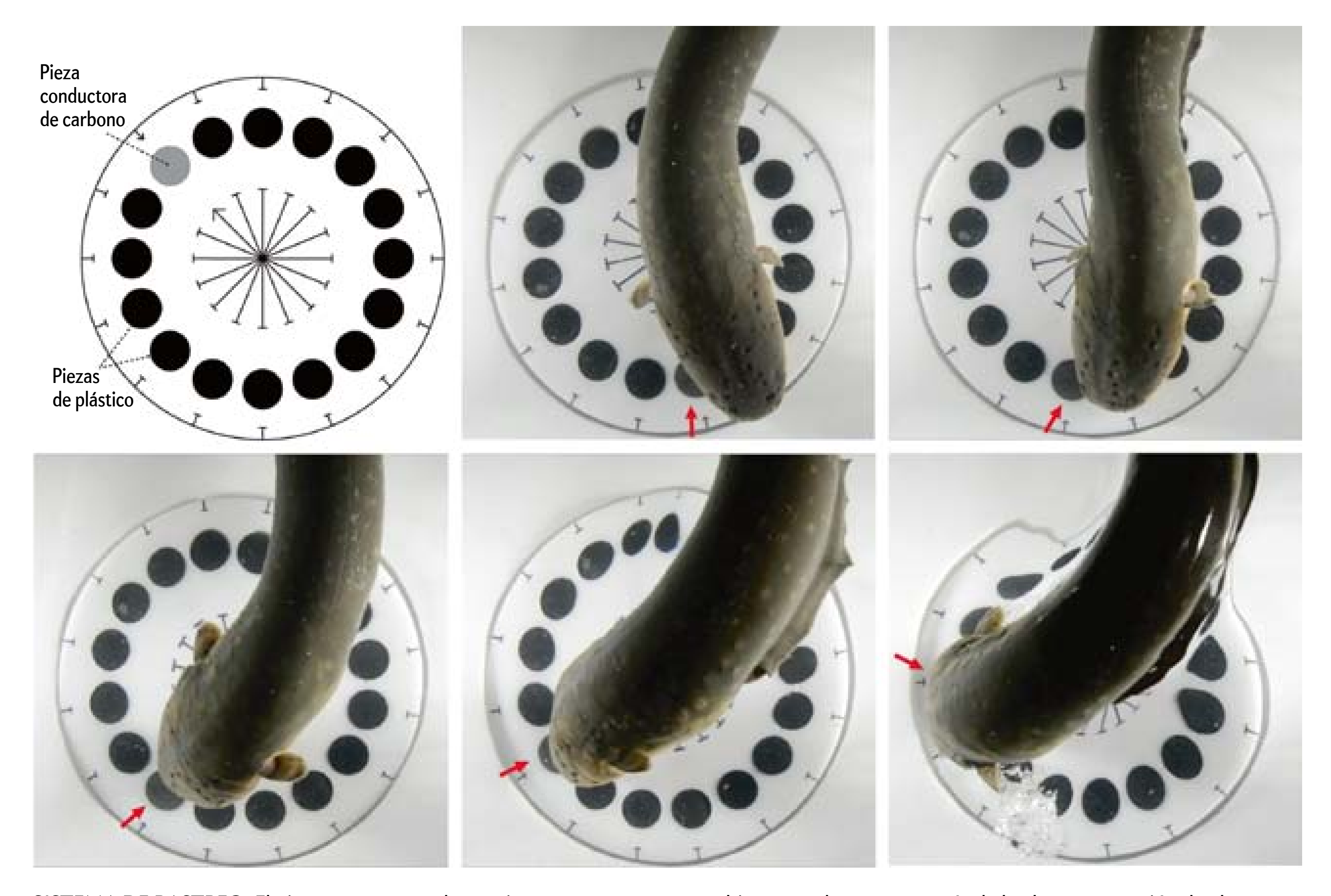
Las descargas potentes provocan en el pez muerto enérgicas contracciones musculares que comienzan tres milisegundos después del inicio del ataque, exactamente el mismo lapso que transcurre en las películas a cámara lenta antes de que uno vivo quede paralizado. Al parecer, el gimnoto inventó la pistola

EN SÍNTESIS

Es sabido que el gimnoto, o anguila eléctrica, aturde a sus presas. Pero el mecanismo del ataque y el modo en que afectan las descargas eléctricas a la presa eran un misterio.

Una serie de experimentos de laboratorio han revelado de qué forma usa los campos eléctricos para detectar, localizar con precisión y paralizar a las presas.

El gimnoto también recurre a su arma eléctrica cuando se siente amenazado y salta fuera del agua para intensificar la descarga que propina a los depredadores.



SISTEMA DE RASTREO: El gimnoto es capaz de seguir a sus presas y a otros objetos conductores a través de la electrorrecepción de alto voltaje. En experimentos en los que se le presenta un disco giratorio provisto de una pieza conductora, intercalada entre otras que no lo son, el animal consigue señalarla con notable precisión.

KENNETH C. CATANIA

mucho antes que el hombre. Pero los experimentos revelaron bastante más. El gimnoto no activa directamente la musculatura de la presa, sino los nervios que terminan en ella. Cada impulso de alto voltaje genera un potencial de acción, o impulso nervioso, en los nervios motores de la víctima.

El descubrimiento resulta notable si uno repara en que su órgano eléctrico no es otra cosa que un músculo modificado activado por nervios motores, estos a su vez estimulados por neuronas del cerebro. Para generar cada impulso de alto voltaje, la secuencia de órdenes parte del cerebro y viaja hasta las motoneuronas, que activan el órgano. Desde allí, la señal eléctrica se propaga por el agua y estimula las motoneuronas del pez cercano, y después, sus músculos. En otras palabras, inmoviliza a su presa mediante una forma de control remoto de alta fidelidad.

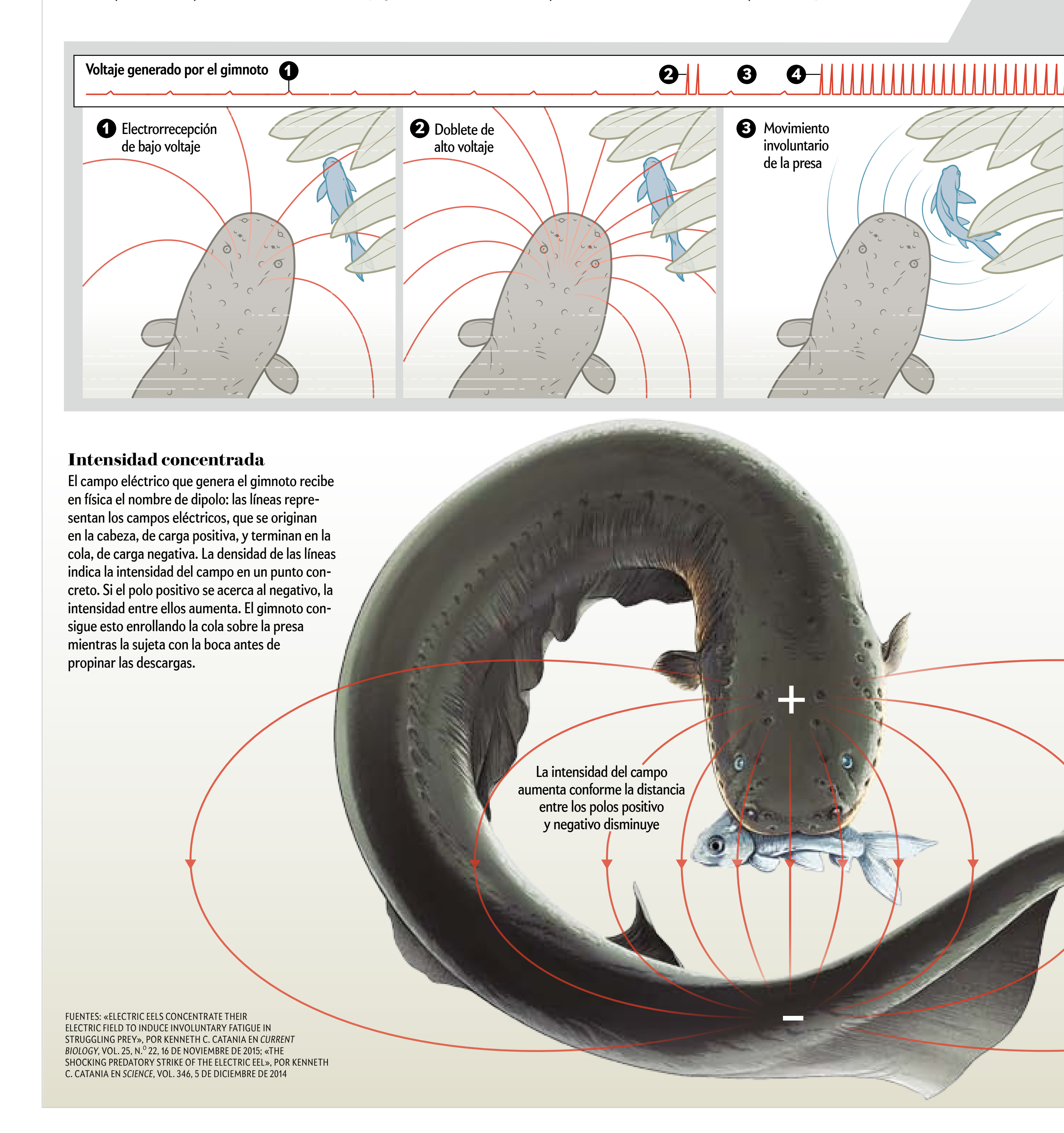
Sorprendentemente, lo anterior induce a pensar que la descarga eléctrica depende en parte de lo que les suceda a los músculos de la presa. A la vista del hallazgo, comencé a contemplar las descargas de alto voltaje desde una perspectiva nueva. Me intrigaban sobremanera las descripciones de un antecesor, Richard Bauer, quien en 1979 comprobó que los gimnotos intercalaban pausas para emitir pares de impulsos de alto voltaje, cada uno separado por dos milisegundos. Esos pares se llaman dobletes, y todos los ejemplares de mi laboratorio los mostraban. ¿Cuál era su cometido?, me pregunté.

Indagué un poco en la fisiología muscular y averigüé que los dobletes (que podrían describirse como pares de potenciales de acción) enviados por las motoneuronas a los músculos constituyen el mejor modo de generar una tensión muscular máxima. En consonancia con esto, mis experimentos revelaron que los dobletes del gimnoto provocan una breve pero enérgica contracción del cuerpo de la presa, a diferencia de las ráfagas, que causan una parálisis duradera. El espasmo, a su vez, genera un fuerte desplazamiento del agua, básicamente perceptible como un sonido subacuático. Dada la aguzada sensibilidad de la anguila al más tenue movimiento del agua, me vino a la cabeza una posibilidad interesante: ¿podían ser los dobletes una forma de tantear a la presa e inquirir si estaba viva? A fin de cuentas, este cazador nocturno nada en las aguas de los ríos sudamericanos rodeado por una enorme variedad de presas ocultas, mucho más difíciles de localizar que las lombrices y los carpines dorados que se le suministran en el acuario.

Una observación apoyaba esa idea: cuando los gimnotos de mi laboratorio cazaban una presa que les resultaba nueva, como un cangrejo de río, o que permanecía oculta entre las plantas del acuario, solían emitir dobletes mientras buscaban; solo atacaban cuando alguna se estremecía, como si su movimiento los pusiera en guardia. Para obtener pruebas más directas, decidí unir con cables un pez muerto a un estimulador eléctrico que podía accionar yo mismo o el gimnoto con sus dobletes. A continuación, introduje el pez cableado en una bolsa provista de cremallera, de modo que los dobletes no pudieran afectarle. Con este montaje experimental pude decidir el momento en que se contraería la musculatura del pez. Sin duda, el gimnoto nunca atacaría tras emitir un doblete si la presa permanecía inmóvil. El

Localizar, paralizar y devorar

A semejanza de una pistola táser, el gimnoto emite impulsos eléctricos que paralizan a la presa. Las descargas activan las motoneuronas que controlan la musculatura de la víctima. Se puede decir que toma el control del pez a distancia y se sirve de él con dos fines: hacer que tiemble para descubrir su escondrijo y, una vez localizado, paralizarlo para impedir la huida. De igual modo, emite electricidad para seguir a presas en movimiento. Y ha desarrollado una solución ingeniosa para un problema fundamental que ocurre en el medio acuático, donde gran parte de la electricidad se disipa en el agua.



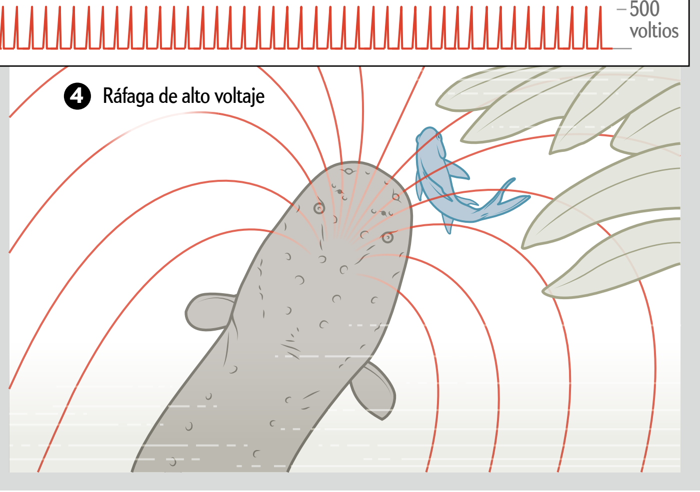
Intensidad concentrada

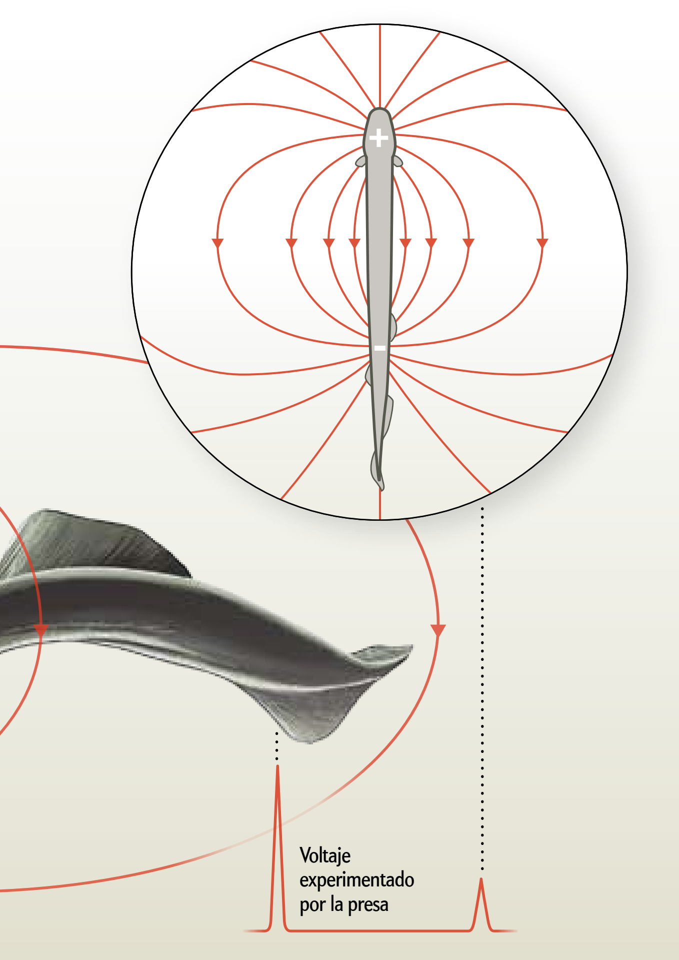
El campo eléctrico que genera el gimnoto recibe en física el nombre de dipolo: las líneas representan los campos eléctricos, que se originan en la cabeza, de carga positiva, y terminan en la cola, de carga negativa. La densidad de las líneas indica la intensidad del campo en un punto concreto. Si el polo positivo se acerca al negativo, la intensidad entre ellos aumenta. El gimnoto consigue esto enrollando la cola sobre la presa mientras la sujeta con la boca antes de propinar las descargas.

FUENTES: «ELECTRIC EELS CONCENTRATE THEIR ELECTRIC FIELD TO INDUCE INVOLUNTARY FATIGUE IN STRUGGLING PREY», POR KENNETH C. CATANIA EN *CURRENT BIOLOGY*, VOL. 25, N.º 22, 16 DE NOVIEMBRE DE 2015; «THE SHOCKING PREDATORY STRIKE OF THE ELECTRIC EEL», POR KENNETH C. CATANIA EN *SCIENCE*, VOL. 346, 5 DE DICIEMBRE DE 2014

Etapas de la caza

El gimnoto explora el entorno con las descargas de bajo y alto voltaje ❶. Cuando anda en busca de presas ocultas entre la vegetación sumergida, emite pares de impulsos de alto voltaje, o dobletes, que provocan espasmos en los peces cercanos ❷. La sacudida que sufren desplaza el agua circundante y esto los delata ❸. Una vez localizada la víctima, lanza una ráfaga de alto voltaje que la paraliza, momento que aprovecha para devorarla ❹.





MATTHEW TWOMBLY

experimento demostró que, en realidad, solo atacaba si percibía los movimientos que el doblete desencadenaba en la víctima.

En suma, la anguila ejerce dos modos de control remoto que, juntos, constituyen una de las tácticas de caza más astutas del reino animal: delata a la presa oculta obligándola a moverse y, una vez descubierta, la paraliza.

LANCE REDOBLADO

El control remoto del movimiento de otro animal ya resulta por sí solo impresionante, pero las artimañas del gimnoto no acaban ahí. Ha adoptado una ingeniosa solución a un problema fundamental de su generador eléctrico. A diferencia de los superhéroes o los magos que dirigen a voluntad los rayos, cada vez que el gimnoto lanza una descarga de alto voltaje, la electricidad se propaga de manera uniforme por el agua. Como consecuencia, solo una minúscula parte de ella acaba incidiendo en la presa. El físico y químico Michael Faraday, que casualmente estudió este pez en 1838, nos brindó un modo sencillo de ver el problema: el campo eléctrico generado por el gimnoto es un dipolo, con líneas de fuerza que brotan de la cabeza, donde se concentran las cargas positivas, y acaban en la cola, donde lo hacen las negativas. La densidad de las líneas refleja la intensidad del campo en un punto concreto; esta es máxima en los polos, pero disminuye rápidamente con la distancia. En física elemental, uno aprende que, si el polo negativo se acerca al positivo, la intensidad del campo situado entre ambos aumenta enormemente. Se diría que el gimnoto ha estudiado física, pues eso es justamente lo que hace cuando la presa forcejea y se resiste a la captura: la muerde con fuerza para sujetarla y enrolla la cola (el polo negativo) en torno a ella antes de propinarle una ráfaga de alto voltaje.

Para medir el efecto de esta maniobra, diseñé un «mordedor» para gimnotos, una pareja de electrodos de medición insertados en un soporte plástico que introduje en un pez muerto. Cuando la anguila mordía el cebo, yo agitaba los cables para simular la lucha de la presa. El animal se enroscaba y lanzaba descargas que los electrodos captaban. Como era previsible, la intensidad del campo se duplicó con creces. Es una gran estrategia, pues permite concentrar la potencia, por lo demás fija, en la víctima; es análogo a enfocar el haz de una linterna en un punto brillante.

Lo que le sucedía a la presa era previsible y sobrecogedor. En experimentos posteriores comprobé que ese ataque redoblado desata contracciones musculares a un ritmo frenético que en pocos segundos dejan exhausta a la víctima. Es el equivalente eléctrico de una neurotoxina, que permite al gimnoto reducir a adversarios peligrosos, como un cangrejo de río de grandes dimensiones y armado con pinzas.

MÁS QUE UN ARMA

En el curso de mis investigaciones sobre el comportamiento depredador del gimnoto, me percaté de algo que me hizo preguntarme si las descargas servirían como algo más que un arma. Cuando el animal se lanza al ataque, suelen suceder tres cosas: primero emite una larga ráfaga de impulsos de alto voltaje, después se abalanza sobre la presa y, por último, la engulle. Pero en mis experimentos, cuando el pez muerto se estremecía en la bolsa de plástico aislada, el gimnoto siempre interrumpía el ataque. Emitía las descargas y se lanzaba sobre él, pero acababa abortando el intento antes del mordisco final. ¿Por qué?

Había supuesto que el ataque era «balístico», en el sentido de ser un acto premeditado que, una vez iniciado, se consumaba sin retroalimentación sensorial. Pero se me ocurrió que los impulsos de alto voltaje podrían servir como un sistema de rastreo. Eso ex-

plicaría por qué el animal ignora las presas cuando permanecen aisladas en plástico. El gimnoto desciende de peces que generan campos eléctricos débiles con los que exploran el entorno y que han conservado esa facultad con fines sensoriales. ¿Por qué renunciar al alto voltaje como un instrumento con esa utilidad?

Decidí someter mi hipótesis a prueba y, para ello, saqué partido de las propiedades conductoras de las presas y de la agresiva táctica de caza de nuestro protagonista. Un animal sumergido suele conducir la electricidad mejor que el agua, de modo que el gimnoto se siente atraído por los objetos conductores, pues poseen el sello distintivo de un ser vivo. Conviene recordar, empero, que detecta esos objetos con el sistema de bajo voltaje, que siempre permanece activo hasta que despliega el alto voltaje como arma de ataque. Para explorar la electrorrecepción de alto voltaje, necesitaba examinar su comportamiento a cámara lenta durante los ataques, cuando deja de operar el bajo voltaje y entra en acción el alto.

El primer experimento sencillo consistía en introducir en el acuario una barra de carbono, un conductor inerte, cerca del pez cebo embolsado. De nuevo, el gimnoto atacó al percibir el movimiento del agua causado por el estremecimiento y atacó la bolsa que contenía el pez aislado. Pero esta vez alteró su trayectoria a medio camino e intentó engullir la barra de carbono con un gran mordisco. Aparentemente, había confundido la barra con el pez, como cabría esperar si hubiera usado los impulsos de alto voltaje para localizar a la presa.

Era un inicio estupendo, pero necesitaba más pruebas. Ideé nuevos ensayos con barras de carbono y múltiples barras de plástico, utilizadas estas últimas como control. Cada vez, los gimnotos atacaban el carbono emitiendo las descargas de alto voltaje. Como prueba definitiva mostré un disco giratorio provisto de un solo conductor pequeño encajado en su superficie, acompañado de una serie de piezas no conductoras de aspecto idéntico, a modo de control. La habilidad de las anguilas resultó pasmosa: durante las descargas, podían seguir y atacar al elemento conductor con una velocidad y precisión inauditas en los animales que emplean la electrorrecepción activa. No había duda: el alto voltaje era un arma y al mismo tiempo un sistema sensorial para localizar presas. Mi asombro y mi respeto por el animal no dejaba de crecer cada día; por suerte, porque en breve sería el blanco de otra de sus estratagemas.

UNA TÁCTICA ASOMBROSA

En marzo de 1800, el célebre Alexander von Humboldt contrató a unos aldeanos en la cuenca del Orinoco para que capturaran unos gimnotos para sus experimentos. La empresa acabó convirtiéndose en un episodio épico. Decidieron pescarlos con la ayuda de una treintena de caballos y mulas, que obligaron a entrar en un estanque cenagoso repleto de anguilas. Estas emergieron del fango y comenzaron a saltar contra los intrusos. Los aldeanos gritaban y atizaban con varas a los pobres caballos, que, aterrorizados, querían volver a la orilla, hasta que los gimnotos, agotados, fueron presa fácil. Dos caballos cayeron fulminados en el agua, mientras otros, tambaleantes, acabaron desplomándose en la orilla. Humboldt publicó en 1807 una crónica de viajes en la que narraba el episodio que contribuyó a la fama del naturalista. Pero en años posteriores, algunos eruditos no dieron crédito a su relato. ¿Por qué atacar a animales de semejante talla, que no podían devorar, exponiéndose a salir mal parados en la lucha? Durante más de 200 años no se tuvo noticia de nuevos ejemplos de esa conducta, hasta que un buen día elegí la red equivocada para atrapar un ejemplar adulto en mi laboratorio.

CONTRAATAQUE

La mejor defensa

Los gimnotos saltan fuera del agua para electrocutar a los supuestos enemigos. Con el propósito de medir la corriente que circula por un ser humano durante ese ataque defensivo, el autor ideó un experimento en el que prestó su brazo para que fuera atacado por un ejemplar joven ❶. Durante el salto, la trayectoria habitual que sigue la corriente (*flechas rojas*) desde la cabeza hasta la cola del animal toma otro camino que atraviesa el blanco y que intensifica el voltaje ❷. En el punto más alto del salto, la intensidad que recibe la víctima ronda los 43 miliamperios, un calambrazo doloroso que obligó al autor a retirar por acto reflejo el brazo ❸. Un individuo adulto seguramente propinaría una descarga mucho mayor.

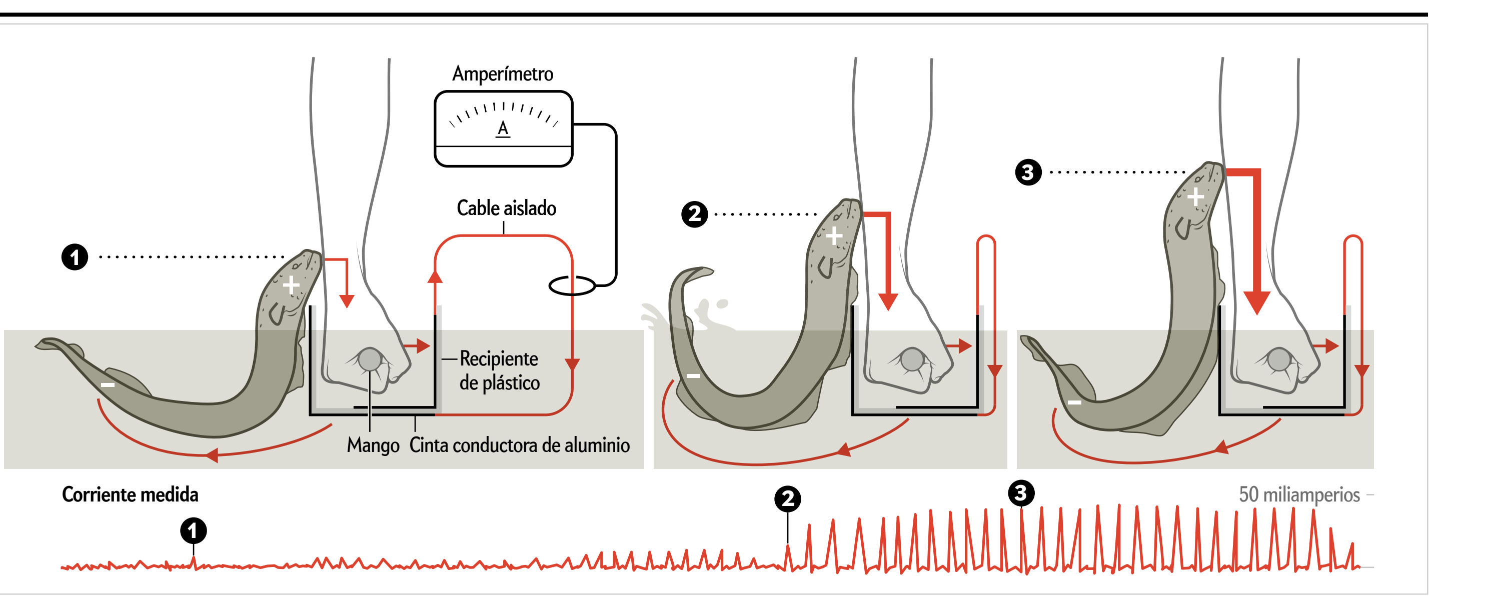
Por norma general, los gimnotos no saltan fuera del agua en el acuario. Pero hay una excepción: si uno se acerca a un ejemplar acorralado con un objeto conductor grande que sobresalga fuera del agua, es probable que reaccione con un ataque fulminante. Descubrí este comportamiento cuando me disponía a trasladar uno a un nuevo acuario con un salabre de aro y mango metálicos. De repente, se revolvió, saltó y mordió con fuerza el mango, al tiempo que disparaba una larga ráfaga de alto voltaje. Por suerte, llevaba puesto un guante aislante de goma. Todos los ejemplares a los que puse a prueba reaccionaron con esa temible táctica defensiva.

Al indagar en las consecuencias eléctricas del salto del gimnoto y en los relatos de Humboldt, muchas piezas del puzle biológico e histórico comenzaron a encajar. Si el pez interpreta que los objetos conductores pequeños pueden ser un bocado, cabe pensar que un conductor voluminoso que se aproxime parcialmente sumergido pueda ser un animal grande y amenazador, como un gran felino o un caimán. ¿Por qué no huye nadando? En las cuencas del Orinoco y del Amazonas no es infrecuente que queden atrapados en pequeños estanques o charcas durante la estación seca, donde son vulnerables a los merodeadores; es la misma situación narrada por Humboldt. Añadamos que cuando permanecen sumergidos no pueden «apuntar» su arma eléctrica, y tendremos la receta para esa sorprendente estrategia.

¿Así que el dramático relato de Humboldt es cierto? Este no aporta grandes detalles, pero hallé una ilustración casi desconocida del fenómeno, publicada décadas más tarde en un libro del explorador Robert Schomburgk, un conocido del naturalista alemán. El protagonista es un caballo electrocutado por un gimnoto que ha saltado del agua y se aferra a su pecho por la boca. Es el vivo retrato de los ejemplares saltarines de mi laboratorio.

LA TENSIÓN SE ACUMULA

Ciertos artículos resultan difíciles de justificar ante el departamento de compras de la universidad, y los brazos de zombi encajan perfectamente en esa categoría. Así que puse dinero de mi bolsillo para comprar algunos y destinarlos a otra serie de experimentos con los que pretendía dilucidar el salto del gimnoto. Después de rascar la sangre pintada, instalé en ellos



numerosos diodos LED en puntos estratégicos que imitaban el recorrido de los nervios y se los presenté a mis gimnotos. Si acercaba un brazo a uno, reaccionaba sin dudarlo con el salto defensivo: las luces centelleaban cuando saltaba del agua y lo electrocutaba. Pero ¿cómo y por qué sucedía exactamente esto?

Obtener la respuesta exigía deducir el llamado circuito equivalente y calcular después el voltaje, o fuerza electromotriz, del órgano eléctrico del gimnoto. También precisaba calcular cuánto reducían los componentes del circuito el flujo de corriente que circulaba por él, una propiedad conocida como resistencia. Así que diseñé experimentos para medir cada variable sucesivamente, comenzando por el órgano eléctrico. Con un metro de largo, el gimnoto más grande del laboratorio generaba un potencial de 382 voltios y una resistencia interna de solo 450 ohmios, lo cual se traducía en corrientes de casi un amperio si no había ninguna otra resistencia. Se trata de una sacudida realmente potente, mucho mayor que la de una pistola táser.

Cuando uno de ellos emerge del agua y presiona su mandíbula inferior contra la víctima, la trayectoria que sigue la corriente de la cabeza a la cola del animal se apaga progresivamente (ya que el aire es un mal conductor) y es sustituido por otro que recorre a la víctima. Se parece de forma asombrosa a un botón de volumen: el gimnoto sube el «volumen» en la víctima a medida que sobresale más y más del agua. Esta observación explica cómo pudo surgir gradualmente el comportamiento, pues incrementar la altura supone una ventaja. Pero ¿con qué eficiencia consigue el gimnoto subir el «volumen»?

Al ahondar en los detalles, acabé bregando con los aspectos más elementales de los problemas de circuitos: calcular la corriente que recorre un circuito con dos resistencias en paralelo. Es uno de los problemas favoritos de esta disciplina en los exámenes de física, ya que es imposible calcular la corriente del circuito sin conocer el valor de ambas resistencias. Averigüé la solución en una de ellas —la trayectoria de la cabeza del pez al agua— tomando mediciones de ejemplares que atacaban a placas metálicas conectadas a un voltímetro. La segunda era el brazo, el blanco. Después de recabar datos de las demás variables, solo podía conjeturar sobre este último valor: la resistencia compleja que se establece entre la mandíbula del gimnoto, un blanco viviente y el agua circundante.

Renunciar a trabajar en el circuito sin haber obtenido las respuestas definitivas era difícil. Además, justo en el momento en que se publicaba en 2016 mi primer artículo donde daba a conocer el salto defensivo, aparecía en Internet un vídeo en el que un gimnoto de gran talla se encaramaba sobre un pescador (este quedó paralizado momentáneamente, pero se recuperó). De repente, el circuito que había estado estudiando por pura curiosidad tenía consecuencias en el mundo real.

No había otra alternativa que usar mi propio brazo para determinar la última variable y contrastar empíricamente las predicciones de todas las mediciones previas. Elegí un ejemplar pequeño, con una fuerza electromotriz de 198 voltios y una resistencia interna de 960 ohmios. Fabriqué un aparato que mediría la corriente que circularía por mi brazo durante el ataque, así resolvería al fin el circuito. Puedo afirmar con pleno conocimiento que los gimnotos dominan perfectamente la técnica de la intensificación.

Cuando comencé el proyecto pensaba que tal vez enseñaría algo sobre ellos, pero al final fueron ellos los que me dieron una lección a mí. Es la misma que vuelvo a recibir cada vez que investigo una especie nueva: los animales siempre resultan mucho más interesantes de lo que pueda suponer, de un modo que nunca sé antever. Me mantiene en vilo por las noches, en el buen sentido, pensar en todo lo que nos queda por descubrir. IyC

FUENTE: «POWER TRANSFER TO A HUMAN DURING AN ELECTRIC EEL'S SHOCKING LEAP», POR KENNETH C. CATANIA EN *CURRENT BIOLOGY*, VOL. 27, N.º 18, 25 DE SEPTIEMBRE DE 2017; MATTHEW TWOMBLY *(ilustración)*

PARA SABER MÁS

The shocking predatory strike of the electric eel. Kenneth Catania en *Science*, vol. 346, págs. 1231-1234, 5 de diciembre de 2014.

Electric eels use high-voltage to track fast-moving prey. Kenneth C. Catania en *Nature Communications*, vol. 6, artículo n.º 8638, 20 de octubre de 2015.

Power transfer to a human during an electric eel's shocking leap. Kenneth C. Catania en *Current Biology*, vol. 27, n.º 18, págs. 2887-2891, 25 de septiembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Un depredador nato. Kenneth C. Catania en *IyC*, junio de 2011.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



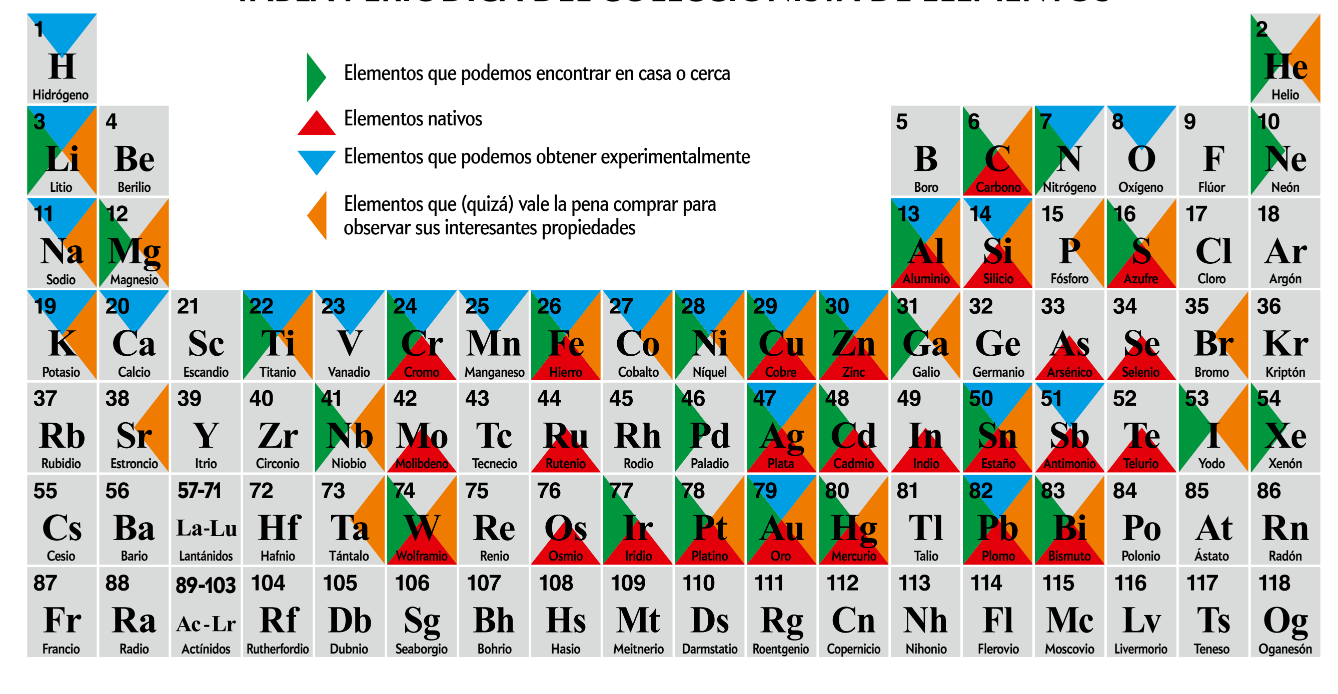
El arte de coleccionar elementos químicos

O cómo materializar la tabla periódica, un fenomenal constructo científico y un paraíso para el experimentador inquieto

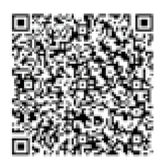
Decía el extraordinario Jorge Wagensberg, divulgador científico y museólogo de prestigio internacional, que la tabla periódica pergeñada por Dmitri Mendeléiev hace ahora 150 años es uno de los mayores logros intelectuales de la ciencia contemporánea. Admiraba esa forma de resumir en una simple hoja de papel el vasto corpus de conocimiento necesario para describir los elementos químicos y sus propiedades. Quien esto escribe no puede estar más de acuerdo.

Pero mi admirado profesor Wagensberg también solía decir que una colección de elementos químicos no era más que un contenedor con piedrecillas de colores más o menos aburridas. En eso, en cambio, nunca he estado de acuerdo. Y aprovecharé que este año celebramos el 150 aniversario del nacimiento de la tabla periódica para demostrarlo científicamente. El coleccionismo de elementos químicos ofrece una maravillosa puerta de entrada a la belleza, material e intelectual, de la química, nos permite descubrir las propiedades de los mismos, ensayar su comportamiento y desarrollar nuestra percepción sensitiva. Desgranaremos estos aspectos a lo largo del texto.

TABLA PERIÓDICA DEL COLECCIONISTA DE ELEMENTOS



Versión para imprimir, en nuestra web



Vayamos por partes. Para formar los casi 10.000 minerales que existen en nuestro planeta, las innumerables moléculas orgánicas que componen las formas vivas y los millones de compuestos artificiales que empleamos en el mundo contemporáneo tan solo son necesarios poco más de noventa tipos de átomos con los que la naturaleza nos ha obsequiado. Mendeléiev tuvo la genial intuición de agruparlos, según su comportamiento y propiedades, en un infograma: la tabla periódica de los elementos químicos. Con el paso del tiempo, esta se ha enriquecido con nuevos conocimientos hasta convertirse en un potente mapa visual de la estructura atómica.

En esta ocasión, nuestro objetivo será coleccionar muestras —cuanto más puras, mejor— del mayor número posible de elementos y hacerlo de forma que se convierta en una experiencia estimulante y formativa. Expliquémonos. Podríamos caer en el error de solventar el tema a golpe de tarjeta de crédito, ya que lo más cómodo y rápido sería comprarlos de una vez en Internet —se venden muestras espectaculares perfectamente envasadas— o en alguna tienda de material de laboratorio o productos químicos. Pero eso sería poco enriquecedor y muy, muy caro. Por otro lado, si al elemento químico le sumamos ejemplos de sus fuentes de obtención y aplicaciones, obtendremos una auténtica enciclopedia elemental. Ilustremos este punto con un ejemplo.



MARC BOADA FERRER

El cobre es un elemento abundante, fácil de conseguir y con importantísimas aplicaciones. Como muestra del elemento puro podemos hallar sin dificultad un buen trozo de barra prismática en algún taller de electricidad industrial. También podemos obtener el cobre a partir de un amplio abanico de minerales. En cuanto a las aplicaciones, se utiliza, sobre todo, para el suministro eléctrico, la refrigeración, la conducción de agua en el ámbito doméstico y la preparación de aleaciones como el latón o el bronce.

A menudo, cuando alguien se propone confeccionar una colección de elementos me pregunta por dónde empezar. La respuesta es simple: hallaremos muestras de elementos químicos puros básicamente en cuatro ámbitos o, lo que es lo mismo, explorando cuatros grandes «yacimientos». Comenzaremos por lo cercano y avanzaremos hacia lo abstracto.

Nuestra primera expedición será de andar por casa. Tanto en nuestro hogar como en comercios de proximidad podemos proveernos de un buen número de especímenes de elementos prístinos; eso sí, en forma de aplicación, casi nunca en bruto. En el joyero encontraremos oro y plata casi puros. En el estudio, carbono (en el lápiz de grafito), wolframio (en el filamento de una bombilla antigua) e iridio (en la punta de una pluma estilográfica). En la cocina, aluminio (en forma de papel) y cobre (en forma de cable eléctrico). Y en el botiquín, quizá mercurio (en aquel viejo termómetro que deberíamos sustituir por uno menos tóxico). Sin salir de casa podemos localizar entre 10 y 15 elementos químicos.

Salgamos ahora a la calle. En la tienda de recambios de automóvil encontraremos iridio y platino (en los electrodos de una bujía). En la carpintería metálica, aluminio, hierro y cobre (en forma de perfiles). En la ferretería, tornillos cromados, niquelados, zincados y cadmiados, que, sin ser muestras macizas de cromo, níquel, zinc ni de cadmio, sí permiten descubrir el color de estos elementos. En la fontanería encontraremos plomo y estaño puros (en forma de varillas). En la droguería, azufre. En una tienda de productos de seguridad, americio (en los detectores de humo por ionización). En la farmacia, yodo. En establecimientos dedicados a tatuajes y *piercings*, titanio y niobio (en los adornos corporales). Y en las tiendas de esoterismo o minerales, bismuto, silicio y carbono vítreo (se venden como pseudominerales), además, claro está, de los minerales que ya de por sí constituyen muestras de elementos relativamente puros de origen natural.

Pasemos ahora a los elementos o minerales nativos que acabamos de citar. Todos sabemos que, esparcidas por ahí, hay pepitas de oro que se buscan con afán. Ello se debe a la nobleza química de este preciado elemento. Sus vecinos de arriba (en la misma columna de la tabla periódica), la plata y el cobre, también se encuentran puros en el sustrato mineral. Pero, curiosamente, hay muchos elementos más reactivos que se pueden encontrar libres en plena naturaleza cuando la mineralogénesis lo per-

mite. Nos referimos al azufre, el selenio, el telurio, el mercurio, el platino, el bismuto, el antimonio, el arsénico, el hierro, el plomo y el carbono (tanto en forma de diamante como de grafito). Y la lista sigue. Preparando esta colaboración he descubierto con asombro que también se han hallado, en estado casi puro, iridio, osmio, aluminio, silicio, cromo, zinc, molibdeno, rutenio, cadmio, indio, estaño y wolframio. Es decir, el sustrato geológico de nuestro planeta nos ofrece al menos unos 25 elementos químicos de origen natural, sin duda las joyas de nuestra colección.

Si de minerales se trata, se nos abre un nuevo espacio de obtención: la síntesis —permítanme la broma— en condiciones de laboratorio. A partir de la malaquita es muy fácil obtener cobre (un calentamiento intenso con algo de carbón mezclado será suficiente). Lo mismo podemos hacer con la plata y sus minerales [*véase* «Arqueometalurgia», por Marc Boada; Investigación y Ciencia, marzo de 2005]. Más difícil, pero no demasiado, es conseguir plomo a partir de la galena, estaño de la casiterita, antimonio de la estibina o zinc de la blenda. Mayor pericia experimental deberá tener el coleccionista que quiera obtener hierro [*véase* «Microsiderurgia», por Marc Boada; Investigación y Ciencia, febrero de 2015], cobalto, níquel, manganeso y cromo de sus óxidos naturales. Y, ya con mayor detenimiento, podemos separar el silicio y el titanio de la arena de playa [*véase* «Tesoros en la arena», por Marc Boada; Investigación y Ciencia, agosto de 2011].

La capacidad de experimentación metalúrgica es importante, no solo para obtener los elementos metálicos de sus fuentes minerales (recordemos que son la parte del león de la tabla periódica), sino también porque, una vez conseguido ese reto químico y disponiendo de la técnica necesaria, resulta mucho más fácil fundir lingotes idénticos de los distintos metales.

No terminaríamos de buscar elementos metálicos si antes no atendiéramos a otras posibilidades. La primera: el reciclaje. Fundir esos lingotes a partir de latas de aluminio, de tuberías de plomo y cobre e, incluso —y es una afición que cuenta con muchos seguidores— separar el oro de los diversísimos componentes electrónicos que quedan obsoletos cada día es fácil, muy fácil. Y, para los más expertos, existen todavía otras opciones como la obtención electrolítica de sodio, potasio, litio o calcio por la vía de la electrolisis de las sales fundidas. Mediante procedimientos puramente metalúrgicos o electrometalúrgicos podemos proveernos, pues, de unos 15 o 20 elementos.

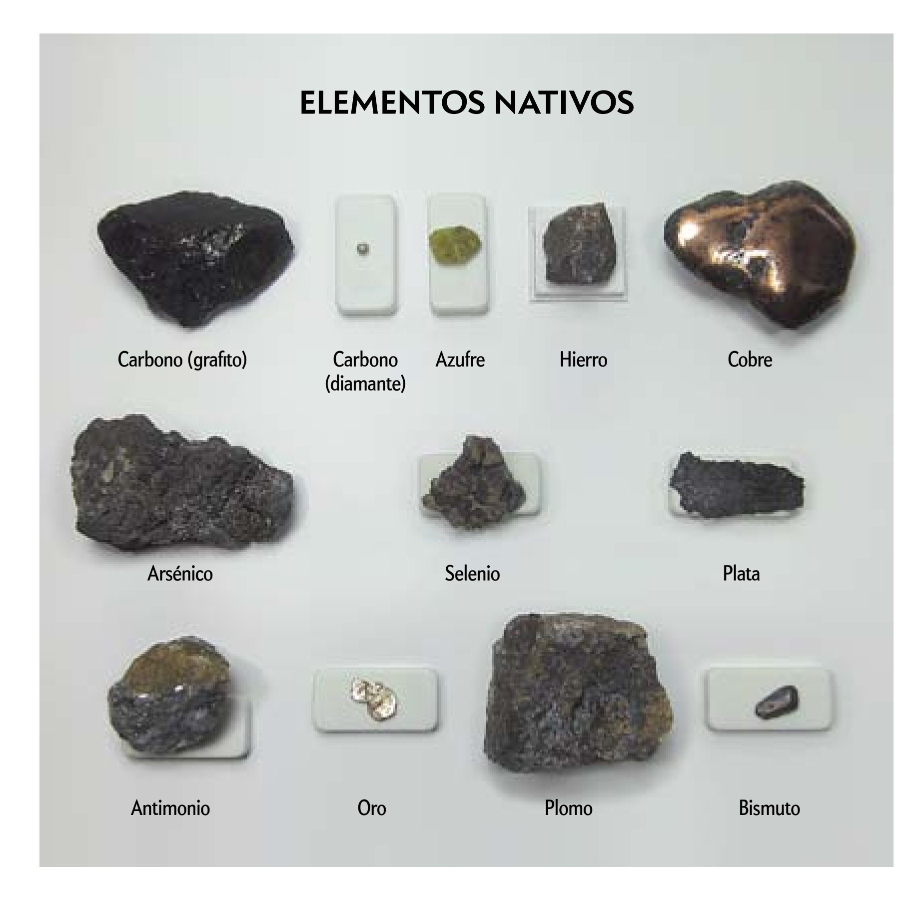
Para los que no dispongan de un excelente sistema de ventilación o una cabina de absorción de gases donde llevar a cabo esos experimentos, lo mejor es localizar alguna empresa especializada en la venta de metales técnicos. Estas compañías ofrecen metales listos para su aplicación a un precio mucho más razonable que el de las muestras purísimas que acostumbran a vender los suministradores de material para laboratorio, sector al que deberemos llegar para conseguir buena parte de la tabla periódica.

Elementos interesantes porque dan paso a un amplio grupo de la tabla periódica, como el cerio, con espectros de emisión espectaculares como el estroncio, o con propiedades físicas singulares como el gadolinio, escapan a nuestras posibilidades experimentales. Por desgracia, estos tienen siempre un precio elevado y la inversión se justifica solo, quizá, por su interés científico.

Pasemos ahora a los elementos que son gases a temperatura ambiente. El aire es una mezcla cuyos componentes mayoritarios son el oxígeno y, sobre todo, el nitrógeno. Podemos considerar que un balón de vidrio lleno de aire contiene una muestra de nitrógeno con una quinta parte de impurezas. Pero podemos purificarlo mucho más mediante un simple proceso de absorción del oxígeno presente. Llenemos un balón de vidrio con el aire insuflado a través de un tubo de cobre lleno de lana de acero calentados fuertemente con un soplete. El gas que emerge es nitrógeno casi puro. Pasemos ahora al oxígeno. Pongamos agua oxigenada en un matraz, añadamos algo de pirolusita machacada o unas gotas de sangre humana. Empezará una fuerte efervescencia (ambas sustancias catalizan la descomposición del peróxido de hidrógeno), que liberará oxígeno suficiente para llenar un globo. Otra opción para conseguir oxígeno consiste en electrolizar agua acidulada, con lo que, ade-



MARC BOADA FERRER



LINGOTES DE ELEMENTOS METÁLICOS COMUNES

Magnesio Aluminio Manganeso Hierro Cobre Zinc

Plata Cadmio Estaño Antimonio Plomo Bismuto

MARC BOADA FERRER

más, obtendremos hidrógeno. Atención: ¡la mezcla es explosiva!

¿Qué ocurre con los otros gases? Sorprendentemente, podemos conseguir con facilidad lámparas eléctricas rellenas con algunos de ellos. Hay bombillas con argón, neón, xenón y criptón. Bajo una suave descarga eléctrica, lucen con bellos colores. Otra opción más cara la encontraremos en algunas páginas web que ofrecen tubos de descarga a alta tensión de todos los gases. Y, ya en otro plano, podemos localizar lámparas industriales de vapor de mercurio, de sodio y de amalgama de galio.

Vemos, pues, que, buscando por casa, visitando tiendas y ferias de minerales, explorando talleres mecánicos, ferreterías, lampisterías, buscando por Internet en páginas para coleccionistas o solicitando oferta a especialistas en productos químicos podemos materializar buena parte de la tabla periódica. Sin embargo, como decíamos al principio, resulta más interesante aderezar la colección con las aplicaciones prácticas y, atención, específicas, de cada elemento.

Recomiendo centrarse primero en las aplicaciones que materializan una propiedad física singular. Por ejemplo: el hierro destaca por su tenacidad, flexibilidad o por sus propiedades magnéticas; el aluminio, por su baja densidad, y lo mismo le ocurre al magnesio. Por tanto, buscaremos aplicaciones que pongan de manifiesto estos aspectos.

También podemos explorar el mundo de los medicamentos. Se prescriben compuestos de litio para tratar los estados de ánimo bajos; de bismuto, para mejorar el funcionamiento del sistema digestivo; el potasio, en forma de cloruro, para las articulaciones; el gadolinio, como contraste, se utiliza en la obtención de resonancias magnéticas; el nitrógeno, en forma de nitroglicerina, para evitar ciertos problemas cardíacos... la lista es larguísima.

Y no solo la farmacopea tiene un nexo directo con los elementos. También el arte. Los pigmentos blancos se obtienen a partir de compuestos sencillos de estaño, plomo o titanio. Los verdes, de hierro o cromo. El zinc, el cadmio y el manganeso se utilizan en pinturas al óleo; el oro, el uranio y el cobre, en vidrieras de colores. Más aún, ¿de cuántos elementos químicos puros, o casi, se fabrican tornillos? No será fácil, pero el coleccionista los puede encontrar de al menos 7 elementos casi puros y de, como mínimo, 5 grandes grupos de compuestos. ¿Adivina cuáles? IyC

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Gödel, Hilbert y el teorema de incompletitud

Cuando se arruinaron las esperanzas de hacer de la matemática una disciplina segura y reducible a pilares básicos

José Manuel Sánchez Ron

Hay resultados científicos que conmueven los cimientos de una disciplina e incluso, puede, de la visión del mundo mayoritariamente aceptada antes que ellos. La teoría de la evolución que Charles Darwin dio a conocer en *El Origen de las especies* (1859), el artículo que Albert Einstein publicó en 1905 —luego conocido como el de la teoría de la relatividad especial— o el de James Watson y Francis Crick de 1953 en el que explicaban la estructura de la molécula de la herencia, el ADN, constituyen buenos ejemplos en este sentido.

Otro botón de muestra corresponde a un artículo que publicó en 1931 el lógico natural de Brünn, entonces parte del Imperio austrohúngaro (hoy en la República Checa), Kurt Gödel (1906-1978). El trabajo conmocionó tanto a la matemática como a la filosofía, y arruinó las esperanzas de hacer de la matemática una disciplina segura, reducible a pilares tan básicos como los que proporciona la aritmética. Pero para entender el origen de la aportación de Gödel es preciso antes referirse a otra de las grandes luminarias de la matemática de finales del siglo XIX y primeras décadas del XX: David Hilbert (1862-1943).

David Hilbert y los fundamentos de la matemática

Lo que hizo Gödel fue dar una respuesta negativa a cuestiones que Hilbert planteó a comienzos del siglo XX, comenzando con la célebre conferencia «Problemas futuros de la matemática», que pronunció en el Segundo Congreso Internacional de Matemáticos (París, agosto de 1900). De los 23 problemas que en ella presentó, el segundo tenía el siguiente enunciado: «La compatibilidad de los axiomas de la aritmética: Demostrar que los axiomas no son contradictorios; es decir, demostrar que basándose en los axiomas no se podrá llegar jamás a resultados contradictorios mediante un número finito de deducciones lógicas».

En 1928, Hilbert volvió al tema que había planteado en 1900. Lo hizo durante otro Congresos Internacional de Matemáticos, el octavo, celebrado en Bolonia —fue entonces cuando los matemáticos alemanes decidieron volver a participar en aquellos encuentros, a los que no habían asistido desde después de la Primera Guerra Mundial—. Allí pronunció una conferencia, «Problemas de la lógica matemática», en la que trató del «problema de la decisión» (*Entscheidungsproblem*): «Demostrar si existe un algoritmo para decidir si una proposición matemática es una consecuencia lógica de otras».

El enfoque de Hilbert se englobaba en lo que se denomina «programa formalista», que exigía la formalización de la matemática clásica. Para lograr esto, Hilbert tenía que, en primer lugar, reemplazar los conceptos matemáticos por signos gráficos, las ideas por hileras de signos, los razonamientos por meras manipulaciones combinatorias de esas hileras y las demostraciones por deducciones formales conforme a reglas lógicas «mecánicas». A continuación, había que demostrar la consistencia de esos sistemas formales. Esto era, en realidad, lo que había hecho para la geometría en su libro *Grundlagen der Geometrie* («Fundamentos de la geometría», 1899).

El espíritu que animaba a Hilbert —al igual que a la práctica totalidad de los matemáticos de su tiempo y de los precedentes— se resume bien en un pasaje de su conferencia de 1900 en París, cuya esencia repitió en otras ocasiones: «La convicción de la posibilidad de resolver todo problema matemático representa para nosotros un estímulo precioso durante el trabajo. Escuchamos siempre resonar en nosotros el siguiente llamamiento: Aquí está el problema, busquemos la solución. Tú puedes encontrarla mediante el razonamiento puro. Jamás, en efecto, el matemático se verá reducido a decir: "*Ignorabimus*"». En matemáticas, sostenía


DOMINIO PÚBLICO

KURT GÖDEL (1906-1978).

Hilbert, no existe *ignorabimus*; siempre será posible contestar a preguntas con sentido. Reaccionaba así a la expresión latina *Ignoramus et ignorabimus* («desconocemos y desconoceremos») que había utilizado el fisiólogo alemán Emil du Bois-Reymond en su libro *Über die Grenzen des Naturerkennens* («Sobre los límites de nuestra comprensión de la naturaleza», 1872).

Kurt Gödel

Nuestra mente es objetiva y la matemática, es cierto, constituye uno de los más firmes reductos de la racionalidad, pero lo que no esperaba Hilbert es que se pudiese llegar a conclusiones como la que obtuvo Gödel solo tres años después de su conferencia en Bolonia: que en matemáticas sí existen *ignorabimus*, esto es, proposiciones que son indecidibles, cuya verdad o falsedad no es posible demostrar; más específicamente, que los sistemas formales aritméticos, de carácter muy general, establecidos por Alfred North Whitehead y Bertrand Russell en su seminal —pero a la postre fallido— *Principia Mathematica* (1910, 1912, 1913; su demostración también servía para la aritmética formal de Peano, la teoría axiomática de conjuntos y una amplia variedad de sistemas formales) son, aun siendo consistentes, incompletos, o, en otras palabras, que en ellos existen proposiciones indecidibles (que un sistema sea consistente equivale a decir que no es posible demostrar a la vez una proposición y su contraria). Un sistema como la aritmética contiene proposiciones cuya verdad no se puede probar desde dentro del sistema, de manera análoga, en cierto sentido, a la paradoja lógico-lingüística que tanto afectó a Russell: «Supongamos que un hombre dice: "Soy un mentiroso". Si es mentiroso, su afirmación es verdadera. Si no es mentiroso, entonces, al decir que es mentiroso, es mentiroso, luego dice la verdad (no es mentiroso). Por consiguiente, cualquier hipótesis implica su contradictoria».

Estrictamente, el artículo de Gödel contiene dos resultados: el primer y el segundo teorema de incompletitud. El primero afirma que «cualquier teoría matemática recursiva que sea consistente es incompleta», entendiendo que un sistema formal, A, es completo «si y solo si para cualquier sentencia, ψ, de su sistema formal sucede que ψ es deducible en A o que no-ψ es deducible en A», y que es incompleto «si y solo si existe alguna sentencia, ψ, tal que ni ψ ni no-ψ son deducibles en A». El segundo teorema afirma que es imposible demostrar la consistencia de un sistema formal (que satisfaga condiciones mínimas) utilizando todos los recursos y razonamientos incorporados en el sistema o, lo que es lo mismo, que es imposible demostrar la consistencia de un sistema formal dentro del propio sistema.

En una larga, y en general de carácter técnico, carta que Gödel envió a otro de los gigantes de la lógica matemática de aquella época, Ernst Zermelo (1871-1953), el 12 de octubre de 1931, en respuesta a otra anterior de este del 21 de septiembre (ambos se habían conocido aquel mismo septiembre durante la reunión anual de la Sociedad Matemática Alemana; fue la única vez que coincidieron), aparecen unos pasajes en los que aquel resumía cómo veía su contribución:

Me gustaría todavía señalar que yo veo el punto esencial de mi resultado no en que alguien pueda de alguna manera abandonar cualquier sistema formal (esto se sigue ya del procedimiento diagonal), sino que para todo sistema formal de metamatemática existen proposiciones que se pueden expresar dentro del sistema pero que no se pueden decidir a partir de los axiomas de ese sistema, y que esas proposiciones son incluso de un tipo relativamente simple, a saber, pertenecientes a la teoría de los números enteros positivos. Que uno no puede capturar toda la matemática en un sistema formal ya se sigue del procedimiento diagonal de Cantor, pero sin embargo continúa siendo concebible que uno pueda al menos formalizar completamente ciertos subsistemas (en el sentido sintáctico). Mi prueba demuestra que también es imposible si el subsistema contiene al menos los conceptos de adición y multiplicación de números enteros. (Por formalización debe entenderse: capacidad de retrotraerse a un número finito de axiomas y reglas de inferencia.) Sin duda, las relativamente indecidibles proposiciones son siempre decidibles en sistemas superiores, a los que también aludí expresamente en mi artículo (p. 191, nota a pie de página 48a), pero incluso en esos sistemas superiores permanecen proposiciones indecidibles del mismo tipo, y así ad infinitum.

John von Neumann y Gödel

El artículo de Gödel se publicó en 1931 en la revista *Monatshefte für Mathematik und Physik* bajo el título «Sobre sentencias formalmente indecidibles de *Principia Mathematica* y sistemas afines», pero antes Gödel ya había avanzado su contenido. Lo hizo durante la Segunda Conferencia sobre Epistemología de las Ciencias Exactas que se celebró en Königsberg (ahora Kaliningrado, en Rusia) en septiembre de 1930. Entre los asistentes a aquella reunión se hallaba un polivalente matemático húngaro, John von Neumann (1903-1957), cuyo nombre figura, destacado, en los libros de historia de la matemática, física (mecánica cuántica), computación, neurociencia y economía.

El primer día de la reunión, Rudolf Carnap, miembro del célebre Círculo de Viena y uno de los filósofos más destacados del positivismo lógico (en 1935 emigró a Estados Unidos), y Arend Heyting, matemático partidario de la lógica intuicionista encabezada por Luitzen Brouwer, abordaron las, respectivamente, posiciones logicistas e intuicionistas, mientras que Von Neumann habló sobre el programa formalista de Hilbert, que exigía la formalización de la matemática clásica.

El último día llegó el turno de Gödel. Fue entonces cuando presentó parte de los resultados que le harían famoso (estrictamente, lo que presentó fue una versión del primer teorema de incompletitud). Es muy probable que de todos los que escucharon su presentación fuera solo Von Neumann quien entendiera su profundo significado. El 20 de noviembre, este escribía a Gödel:

Querido Sr. Gödel:
Recientemente he estado ocupándome de nuevo de la lógica, utilizando métodos que usted ha empleado con tanto éxito para mostrar propiedades indecidibles. Al hacer esto, he obtenido un resultado que me parece notable. A saber, he sido capaz de demostrar que no se puede probar la consistencia de las matemáticas.

A continuación le explicaba lo que había hecho, para pasar después a decirle que:

Estaría muy *interesado en conocer su opinión sobre esto [...] ¿Cuándo aparecerá su artículo, y cuándo estarán disponibles*

las pruebas de imprenta? Esto tiene también un interés técnico para mí, ya que querría seguirle lo más cerca que fuese posible, tanto en sustancia como en notación, y por otra parte me gustaría publicar [un artículo sobre estas cuestiones] tan pronto como fuese posible.

Sabemos que Gödel le respondió, pero su carta no se conserva. Sin embargo, todo indica que en ella comentaba que había demostrado el segundo teorema de incompletitud. Sí se conserva lo que Von Neumann respondió, el 29 de noviembre, a esa carta perdida:

Muchas gracias por su separata [se debe referir al artículo que Gödel publicó en 1930 en el volumen 67 de Anzeiger der Akademie der Wissenschaften in Wien, *«Einige metamathematische Resultate über Entscheidungsdefinitheit und Widerspruchsfreiheit»]. Como usted ha establecido el teorema de la indemostrabilidad de la consistencia como una continuación natural y profundización de sus anteriores resultados, está claro que yo no publicaré sobre este asunto. [...]*

Por consiguiente, creo que su resultado ha resuelto negativamente la cuestión fundamental: no existe justificación lógica para la matemática clásica. Qué sentido debemos atribuir a nuestra esperanza, según la cual es de facto consistente, es algo que no sé, pero en mi opinión esto no cambia el hecho completado.

Estoy deseando con gran interés recibir sus pruebas de imprenta.

Por lo que decía en esta carta, parece que Von Neumann también había logrado demostrar el segundo teorema de incompletitud, lo que da idea de su talla como matemático puro. Lo que está claro es que los resultados obtenidos por Gödel le impresionaron. A Carnap le escribía unos meses después, el 7 de junio de 1931:

He sabido de Gödel (al que usted tal vez también conoce) sobre sus resultados en Königsberg y después mediante correspondencia. Estos teoremas (que desde entonces ya se han publicado) demuestran que ciertas afirmaciones lógicas y matemáticas, tales como, por ejemplo, la consistencia del análisis, no se pueden demostrar en ciertos sistemas formales lógicos [...] Por consiguiente, hoy mi opinión es que:

(1) Gödel ha demostrado que el programa de Hilbert es irrealizable.

(2) No existen más razones para rechazar el intuicionismo (si uno no toma en cuenta el tema estático, que en la práctica para mí también será el factor decisivo).



ALBERT EINSTEIN celebra su septuagésimo cumpleaños en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, en 1949. De izquierda a derecha: Howard P. Robertson, Eugene P. Wigner, Hermann Weyl, Kurt Gödel, Isidor Isaac Rabi, Einstein, Rudolf Ladenburg, J. Robert Oppenheimer y Gerard M. Clemence.

En 1931 parece que Von Neumann respetaba a Carnap lo suficiente como para mantener alguna correspondencia con él sobre el importante asunto de los resultados de Gödel. Si era así, en 1939 la situación había cambiado, como demuestra una carta que escribió el 18 de julio de aquel año al físico húngaro (fue catedrático de física teórica en la Universidad Pazmany Peter de Budapest), amigo de la familia de Von Neumann, Rudolf Ortvay:

Yo también pienso que los resultados de Gödel significan que no existe un sistema axiomático «completo», ni siquiera en matemáticas, y creo que actualmente no hay ninguna otra interpretación consistente de esta compleja cuestión. Desde el punto de vista de la discusión y evaluación de lo verdaderamente matemático, esto es, de las cuestiones lógico-matemáticas que hay que discutir y evaluar, considero que las cosas de Carnap son naifs y débiles. Sencillamente, Carnap no posee el conocimiento mínimamente necesario para considerar estos asuntos, menos aún para decir algo nuevo. Así, por ejemplo, expresa con un aire de terrible autoimportancia puntos de vista totalmente naifs y simplistas sobre la cuestión de la «completitud» de la axiomática de la matemática («categoricidad»). Si las cosas fuesen tan sencillas como él imagina, entonces no se necesitaría la «investigación en los fundamentos de la matemática» (Grundlagenforschung), ¡al menos desde el punto de vista de la matemática! ¿Piensa que Carnap tiene algo nuevo o científicamente interesante que decir sobre la estructura de los lenguajes o, más generalmente, que lo que hace acaso pueda ser considerado como estar preparando el terreno para trabajos posteriores más serios? Yo soy totalmente incapaz de juzgar si Carnap merece algún crédito para que su influyente «escuela» de filósofos pueda abordar con seriedad cuestiones filosóficas en las ciencias naturales y exactas. Obviamente, muchos aquí piensan que la respuesta es «sí». De cualquier manera, es una pena que tengamos que informarnos sobre un asunto muy sólido por una fuente tan confusa. N. b. Me entristece especialmente que mientras que el nombre de Gödel está constantemente en los labios de Carnap,

es obvio que él no comprende en absoluto el significado real de los resultados de Gödel.

Gödel a Constance Reid sobre el programa de Hilbert
Aunque los resultados de Gödel de 1931 demostraban que, frente a lo que sostuvo Hilbert, en la matemática existen *ignorabimus*, esto no quiere decir que el fondo del empeño de este, su programa sobre los fundamentos de las matemáticas, quedara destruido. Esta era, al menos, la opinión del propio Gödel, como explicó en una carta que envió el 22 de marzo de 1966 a Constance Reid (1918-2010), conocida especialmente por sus biografías de Hilbert, Richard Courant, Jerzy Neyman, Eric Temple Bell y su hermana, la matemática Julia B. Robinson. Reid había escrito a Gödel el 1 de septiembre de 1965 mientras preparaba su biografía de Hilbert, preguntándole si había conocido personalmente a este y tenido alguna conversación con él relativa a su trabajo. En su contestación, Gödel explicaba que «nunca había coincidido con Hilbert, ni mantenido correspondencia con él», y añadía:

Me gustaría llamar su atención a un punto frecuentemente desdeñado, a saber, el hecho de que el esquema de Hilbert para los fundamentos de las matemáticas continúa siendo muy interesante e importante a pesar de mis resultados negativos.

Lo que se ha demostrado es únicamente que el objetivo específicamente epistemológico que Hilbert tenía en mente no se puede obtener. Este objetivo era demostrar la consistencia de los axiomas de la matemática clásica en base a una prueba tan concreta e inmediatamente convincente como la aritmética elemental.

Sin embargo, contemplando la situación desde un punto de vista puramente matemático, pruebas de consistencia en base a presuposiciones metamatemáticas más fuertes adecuadamente escogidas (como han sido dadas por Gentzen y otros) son igualmente interesantes, y conducen a perspectivas muy importantes sobre la demostración de la estructura teórica de la matemática. Más aún, permanece abierta la cuestión de si, y en qué medida, es posible, en base al enfoque formalista, demostrar «constructivamente» la consistencia de la matemática clásica; esto es, reemplazar sus axiomas sobre entidades abstractas de un ámbito platónico objetivo por ideas relativas a las operaciones dadas de nuestra mente.

En lo que se refiere a mis resultados negativos, aparte de las consecuencias filosóficas mencionadas antes, yo vería su importancia sobre todo en el hecho de que en muchos casos hacen imposible juzgar, o imaginar, si se puede llevar adelante alguna parte específica del programa de Hilbert en base a presuposiciones metamatemáticas dadas.

Pienso que, en alguna ocasión adecuada, publicaré esto, o alguna descripción similar sobre la relación entre mi trabajo y el programa de Hilbert.

Como nunca llegó a cumplir con semejante intención, su carta a Reid constituye un documento particularmente valioso.

Repercusión del teorema de Gödel
Con independencia de que el teorema de Gödel figure entre los más importantes resultados de toda la historia de la ciencia, con implicaciones que van más allá de la matemática (afecta profundamente a la filosofía y teoría del conocimiento), sus consecuencias prácticas para la investigación matemática no fueron lo devastadoras que se puede imaginar, dado su desmoralizador fondo. Von Neumann recalcó este hecho en un artículo titulado «El matemático»:

Al desaparecer [debido a los resultados de Gödel] la principal esperanza de una justificación de la matemática clásica —en el sentido de Hilbert o de Brouwer y Weyl—, entonces la mayor parte de los matemáticos decidieron utilizar de todas maneras ese sistema [el «clásico»]. Después de todo, la matemática clásica estaba produciendo resultados que eran tanto elegantes como útiles, e incluso aunque uno no pudiese estar completamente seguro de su certidumbre, se apoyaba en una base tan razonable al menos como, por ejemplo, la existencia del electrón. En consecuencia, si se está dispuesto a aceptar las ciencias, se debe admitir también el sistema clásico de matemáticas. Este punto de vista fue aprobado incluso para algunos de los protagonistas más originales del sistema intuicionista. En la actualidad, la controversia sobre los «fundamentos» no está ciertamente cerrada, pero parece muy improbable que el sistema clásico se abandone salvo por una pequeña minoría.

Otro ilustre matemático, Paul Halmos (1916-2006), insistió en este importante punto en su autobiografía: «Con respecto a los espectaculares teoremas (Gödel y Cohen), los admiramos, pero no han cambiado nuestro trabajo, nuestra filosofía, nuestra vida. Si alguien lograse demostrar que la hipótesis de Riemann es indecidible, nos chocaría, tanto como nos chocó cuando se demostró que el postulado de las paralelas era indecidible, pero nos recuperaríamos. Probablemente proseguiríamos y descubriríamos y estudiaríamos las teorías de los números no riemannianos y viviríamos felices para siempre después». IyC

PARA SABER MÁS

Problèmes futures des mathématiques. David Hilbert en *Compte rendu du Deuxième Congrès International des Mathématiciens, tenu a Paris du 6 au 12 août 1900*. Gauthier-Villars, París, 1902.
The mathematician. John von Neumann en *The works of the mind*. Dirigido por R. B. Heywood. University of Chicago Pres, Chicago, 1947.
I want to be a mathematician. Paul Halmos. Springer-Verlag, Nueva York, 1985.
Kurt Gödel collected works, vol. V (Correspondence H-Z). Dirigido por S. Feferman, J. W. Dawson, jr., W. Goldfarb, Ch. Parsons y W. Sieg. Clarendon Press, Oxford, 2003.
Kurt Gödel: Obras completas. Dirigido por Jesús Mosterín. Alianza Editorial, Madrid, 2006.

EN NUESTRO ARCHIVO

Gödel y los límites de la lógica. John W. Dawson Jr. en *IyC*, agosto de 1999.
Ordenadores, paradojas y fundamentos de las matemáticas. Gregory J. Chaitin en *IyC*, julio de 2003.
Gödel y la verdad axiomática. Agustín Rayo en *IyC*, febrero de 2014.
El problema sin solución. Toby S. Cubitt, David Pérez-García y Michael Wolf en *IyC*, diciembre de 2018.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Actualmente dirige la colección de libros *Grandes ideas de las matemáticas*, de Ediciones El País.



Un nuevo patrón en los números primos

Un experimento numérico muy sencillo revela que el primer dígito de los números primos obedece una curiosa ley

Puede que Dios no juegue a los dados con el universo, pero algo extraño ocurre con los números primos.

—Atribuido a Paul Erdős en referencia a la famosa cita de Einstein

El primer dígito significativo de un número real es el primero a la izquierda distinto de cero. Por ejemplo, el primer dígito significativo del número primo 7703 es 7. Fue el físico Frank Benford quien, en los años treinta del siglo pasado, estableció empíricamente una chocante ley. Para una gran variedad de conjuntos de datos y secuencias matemáticas, el primer dígito significativo d de las cantidades correspondientes no se distribuía de manera uniforme, como tal vez cabría esperar, sino con un sesgo dado por lo que hoy llamamos «ley de Benford».

Dicha ley puede enunciarse como sigue: dado un conjunto de datos y dado un dígito d (1, 2, ..., 8, 9), la probabilidad $P(d)$ de que d aparezca como primer dígito significativo en dichos datos viene dada por:

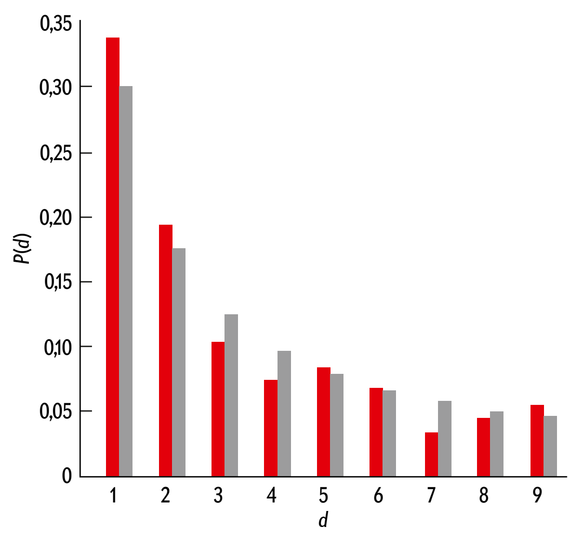
$$P(d) = \log_{10}(1 + 1/d) .$$

En otras palabras: contra toda intuición, los números de muchas grandes colecciones de datos tienen más probabilidades de empezar por 1 que por 2, por 2 que por 3, por 3 que por 4, etcétera.

En realidad, la ley fue descubierta por el astrónomo Simon Newcomb en 1881, quien observó que las tablas de logaritmos estaban notoriamente más gastadas en sus primeras páginas, por lo que dedujo que se consultaban mucho más aquellos números que empezaban por 1, 2 o 3 que aquellos que comenzaban por 7, 8 o 9. Con todo, Benford obtuvo el reconocimiento al documentarla en una tremenda variedad de datos, desde precios de acciones hasta puntos de congelación de sustancias o constantes físicas (*véase la figura 1*). En todas estas listas, alrededor del 30 por ciento de los números comienzan por 1, mientras que aquellos que empiezan por 9 no alcanzan el 5 por ciento.

La ley de Benford, también conocida como ley de los números anómalos, permaneció como una curiosidad hasta que en los años sesenta comenzó a usarse en el diseño eficiente de ordenadores y, más tarde, en la detección de posibles fraudes en datos contables, declaraciones de impuestos, datos científicos experimentales e incluso elecciones (ya que, por ejemplo, si los datos contables de una empresa se alejan mucho de la ley de Benford, es más probable que estén falsificados).

La explicación llegó a mediados de los años noventa, cuando el matemático Theodore P. Hill demostró que la ley de Benford era consecuencia de un teorema semejante al teorema central del límite (el que nos dice que, bajo ciertas condiciones generales, muchos conjuntos de datos tienden a seguir una distribución dada por una campana de Gauss). En concreto, la ley de Benford aparece cuando tomamos valores al azar de una variedad de distribuciones que, a su vez, también son escogidas al azar en cada elección. (Así ocurre, de hecho, cuando usamos una tabla de logaritmos, donde cada vez que la abrimos estamos consultando números procedentes de distribuciones distintas de datos.)



1. LEY DE BENFORD: En numerosas colecciones de datos, el primer dígito de las distintas cantidades no se distribuye de manera uniforme. Esta gráfica muestra la probabilidad $P(d)$ de que el primer dígito de una lista de 201 constantes físicas (en unidades del Sistema Internacional) sea d (*rojo*). Como puede observarse, hay muchos más datos que comienzan por 1, 2 o 3 que por 7, 8 o 9. A su lado se representa la distribución teórica que da la ley de Benford. Este resultado es robusto: no depende de las unidades físicas escogidas ni de la base numérica empleada.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

El caso de los números primos

La ley de Benford también aparece en matemáticas puras. Multitud de secuencias geométricas o recurrencias matemáticas siguen la distribución de Benford, y también se ajustan a ella sucesiones como n^n, $n!$ o los números combinatorios $C(n, k)$, por poner unos pocos ejemplos. Así pues, parece pertinente preguntarnos si ocurre algo semejante con los números primos.

En los años 70, el matemático Persi Diaconis demostró que la

2. CAMINO ALEATORIO: Caminos generados a partir del primer dígito para un conjunto de números naturales escogidos al azar del primer millón (*gris*) y para los números primos del mismo intervalo (*rojo*). Si el primer dígito del número considerado es un 9, no hay movimiento; en caso contrario, se avanza un paso en la dirección indicada por las flechas. Para los números naturales, el camino no presenta direcciones privilegiadas. En el caso de los números primos, sin embargo, la deriva hacia el «noreste» apunta a una sobreabundancia de unos.

ADAPTADO DE «THE FIRST-DIGIT FREQUENCIES OF PRIME NUMBERS AND RIEMANN ZETA ZEROS», BARTOLO LUQUE Y LUCAS LACASA EN *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY A*, VOL. 465, PÁGS. 2197-2216, ABRIL DE 2009

distribución del primer dígito significativo de los números primos era «asintóticamente uniforme». Esto quiere decir que, a medida que consideramos más y más primos, la probabilidad $P(d)$ de que el primer dígito significativo sea d tiende a ser igual para todos los dígitos (es decir, 1/9). Por tanto, esto parece ser un signo de que la distribución de los números primos no sigue la ley de Benford y de que hay tantos primos que empiezan por 1 como por cualquier otra cifra.

Sin embargo, consideremos el siguiente experimento numérico: situémonos en el origen (0,0) del plano coordenado, tomemos al azar un número del intervalo $[1, N]$ con $N = 10^6$, y quedémonos con el primer dígito significativo. Si se trata de un 9, permanecemos en el mismo sitio; en caso contrario, nos moveremos hacia el punto vecino según la dirección que indican las flechas en la figura 2.

Al repetir esta operación una y otra vez, trazaremos una trayectoria en el plano. Si los primeros dígitos significativos de nuestra muestra se distribuyen de manera uniforme, el resultado será un camino aleatorio en dos dimensiones, sin dirección privilegiada alguna. Eso es lo que se observa en la trayectoria gris de la figura 2, en la que los números han sido escogidos al azar entre el primer millón de números naturales.

Sin embargo, si llevamos a cabo el experimento eligiendo al azar solo números primos pertenecientes al mismo intervalo, observamos una clara deriva hacia el «noreste». Es más, si repetimos el experimento, comprobaremos que la deriva es sistemática; es decir, que abundan más los números primos que comienzan por 1 que por cualquier otro dígito.

Pero ¿no se había demostrado que la distribución del primer dígito era uniforme? En realidad, Diaconis demostró que su distribución era *asintóticamente* uniforme. Eso quiere decir que se va haciendo más y más uniforme a medida que nuestro intervalo $[1, N]$ crece. ¿Lo hará de forma errática o siguiendo algún patrón?

Ley de Benford generalizada

Para arrojar luz sobre la cuestión, hemos medido la distribución empírica $P(d)$ del primer dígito significativo de los números primos pertenecientes a intervalos de la forma $[1, N]$, con N cada vez mayor. En la figura 3 mostramos en barras rojas los resultados para intervalos de tamaño 10^8, 10^9, 10^{10} y 10^{11}, los cuales incluyen 5.761.455, 50.847.534, 455.052.511 y 4.118.054.813 números primos, respectivamente.

Si representamos los datos usando los mismos ejes que en la figura 1, las distribuciones se verán casi planas. Pero si ampliamos el eje de ordenadas presentándolo entre los valores 0,105 y 0,120, como hemos hecho en la figura 3, queda patente el sesgo entre dígitos. A pesar de que las distribuciones no se ajustan a una ley de Benford, no cabe duda de que hay un patrón regular, algún tipo de nueva ley para el primer dígito. ¿De qué se trata?

Es fácil comprobar que una distribución de probabilidad $P(x) \sim x^{-1}$ genera datos que cumplen la ley de Benford. Para verlo, basta con integrar la distribución generadora en los intervalos donde el primer dígito es d. Esto nos da la ley

$$P(d) = C \int_d^{d+1} x^{-1} dx$$
$$= \log(d+1) - \log d = \log\left(1 + \frac{1}{d}\right),$$

donde la constante de normalización C resulta ser 1. (Observemos que, como para cualquier intervalo $[d10^D, (d+1)10^D]$ el resultado es el mismo, nos basta hacerlo para uno cualquiera, como $[d, d+1]$.)

A partir de aquí, en 2001 el físico Luciano Pietronero y sus colaboradores propusieron una sencilla generalización de la ley de Benford: si la distribución generadora de los datos es una ley de potencias $P(x) \sim x^{-\alpha}$, entonces la distribución para el primer dígito significativo será

$$P(d) = C \int_d^{d+1} x^{-\alpha} dx$$
$$= \frac{1}{10^{1-\alpha} - 1} [(d+1)^{1-\alpha} - d^{1-\alpha}]$$

(donde el prefactor se debe a que, en el caso general, la constante de normalización es distinta de la unidad). Esta familia de distribuciones (que se reduce a la ley de Benford para $\alpha = 1$) se conoce como «ley de Benford generalizada». ¿Describirá esta familia la asimetría que hemos encontrado en los números primos?

Una nueva ley

En la misma figura 3 hemos pintado en barras grises nuestra ley de Benford generalizada para los cuatro conjuntos de

primos analizados. Como podemos comprobar, los ajustes con valores del exponente α = 0,0583, 0,0513, 0,0458 y 0,0414 resultan extraordinarios.

¿Sigue el exponente α alguna relación sencilla con el tamaño N del conjunto? En la figura 4 hemos representado en rojo los valores $\alpha(N)$ obtenidos al ajustar las distribuciones para valores de $N = 10^4$, 10^5, ..., 10^{11}, y en negro la relación

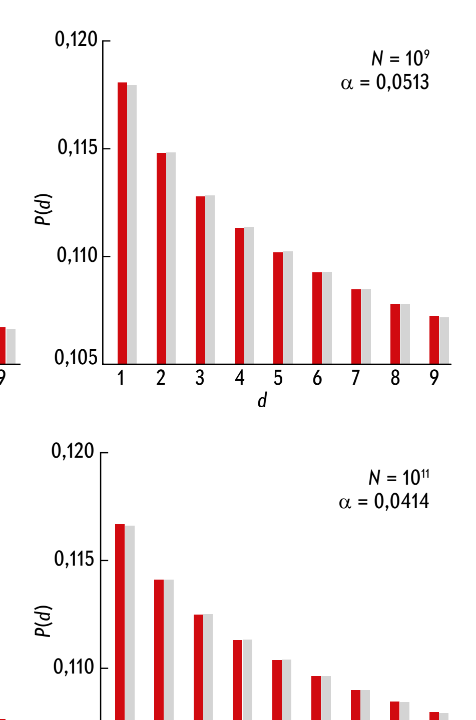
$$\alpha(N) = 1/(\log N - a)\ ,$$

con $a = 1{,}1$, que la ajusta extraordinariamente bien.

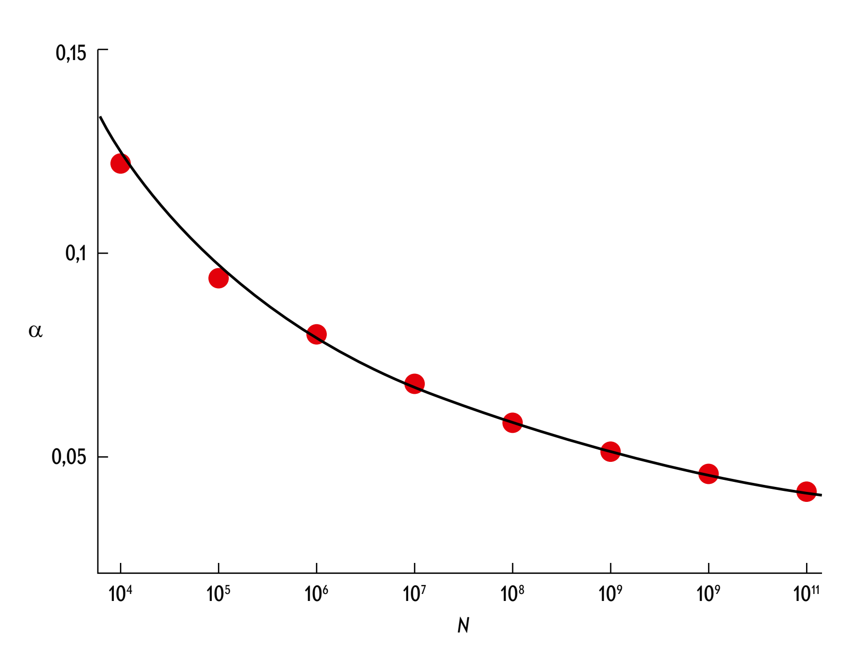
Observemos que α tiende a cero a medida que N tiende a infinito. Y que, para α = 0, la ley de Benford generalizada se reduce a una distribución uniforme, donde cada primer dígito significativo tiene asociada la misma probabilidad, 1/9. De modo que parece que hemos encontrado un nuevo patrón en la forma en que la distribución del primer dígito significativo de los números primos se va haciendo uniforme a medida que tomamos más y más primos.

En 2009, junto a mi colaborador Lucas Lacasa, presentamos estos resultados y otros semejantes para los ceros no triviales de la función zeta de Riemann. Nuestro trabajo demostraba que, en última instancia, dicho patrón es consecuencia del célebre teorema de los números primos y deducía, a partir de él, una nueva función contadora de números primos.

La ley de Benford generalizada es relativamente reciente y, en vista de la ubicuidad de las leyes de potencias y otras distribuciones de probabilidad que la siguen de manera aproximada, seguro que aparece en múltiples listas de datos naturales y matemáticos que hasta ahora no han sido exploradas. De modo que es fácil que nos reserve más de una sorpresa, como este curioso comportamiento de los números primos. ■



3. EL PRIMER DÍGITO DE LOS NÚMEROS PRIMOS: Probabilidad $P(d)$ de que el primer dígito de un número primo en el intervalo $[1, N]$ (con $N = 10^8, 10^9, 10^{10}$ y 10^{11}) sea d (*rojo*) y ajustes a la ley de Benford generalizada para distintos valores del exponente α (*gris*).



4. UNA NUEVA LEY: Dependencia del exponente α con el tamaño N del intervalo de muestreo. Los puntos rojos son los valores de $\alpha(N)$ ajustados a los primos del intervalo $[1, N]$ a través de la ley de Benford generalizada. La línea negra representa el ajuste $\alpha(N) = 1/(\log N - 1{,}1)$.

PARA SABER MÁS

Explaining the uneven distribution of numbers in nature: The laws of Benford and Zipf. Luciano Pietronero et al. en *Physica A*, vol. 293, págs. 297-304, abril de 2001.

The first-digit frequencies of prime numbers and Riemann zeta zeros. Bartolo Luque y Lucas Lacasa en *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 465, págs. 2197-2216, abril de 2009.

EN NUESTRO ARCHIVO

La misteriosa ley del primer dígito. Juan M. R. Parrondo en *IyC*, diciembre de 2002.

La deuda del Estado en decibelios. Norbert Treitz en *IyC*, diciembre de 2012.

Leyes universales. Terence Tao en *IyC*, febrero de 2015.

ADAPTADO DE «THE FIRST-DIGIT FREQUENCIES OF PRIME NUMBERS AND RIEMANN ZETA ZEROS», BARTOLO LUQUE Y LUCAS LACASA EN *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY A*, VOL. 465, PÁGS. 2197-2216, ABRIL DE 2009



EDITANDO GENES: RECORTA, PEGA Y COLOREA
LAS MARAVILLOSAS HERRAMIENTAS CRISPR
Lluís Montoliu
Next Door Publishers, 2019

La magia de CRISPR

Una monografía completa y rigurosa con la que disfrutarán neófitos, docentes y científicos

El título del libro ya invita. Todos hemos aprendido en algún momento de nuestro pasado a recortar, pegar y colorear figuras de papel sobre las láminas que formaban parte de nuestros álbumes escolares. Es esta una acertada analogía de lo que hacen las herramientas CRISPR con el genoma: solo hemos de sustituir el papel por el ADN.

¿Quién no ha oído hablar de la revolución CRISPR? Esta herramienta biotecnológica es capaz de encontrar una secuencia específica de ADN y cortarla, lo que permite que el ADN pueda ser reparado, revisado y modificado por la célula. Como un rayo láser dirigido al genoma, la técnica hace incisiones precisas en lugares concretos con una eficiencia muy elevada. Se habla de ella en clases de universidad y de instituto, en revistas y en congresos científicos. Sus aplicaciones se comentan en medios de comunicación generalistas e inundan las redes sociales. Pero ¿sabemos realmente qué son estas herramientas? ¿Quién las descubrió y cuál es su función natural? ¿Para qué podemos utilizarlas? ¿Por qué hay una guerra de patentes sobre ellas? ¿Qué cuestiones bioéticas se asocian a su uso? ¿Se emplearán en el futuro para crear «bebés a la carta»?

Editando genes da respuesta a estas y otras muchas preguntas. No se trata de un libro de divulgación científica al uso. Aunque es cierto que emplea muchos de los recursos propios del género, como una prosa amena y fácil de leer, lo que realmente hace de él un libro especial es el recuento personal que hace el autor, quien parte de un conocimiento profundo y exhaustivo de las herramientas CRISPR. Ello lo convierte en un libro muy completo incluso para quienes conocemos bien estas técnicas, pues en él se aclaran conceptos, se presentan nuevas ideas y se incluyen divertidos detalles que se nos habían escapado y que proporcionan contexto histórico.

La mayoría de los libros de divulgación no están escritos por los protagonistas de la historia que intentan contar. Se referencia a los científicos que han logrado grandes avances, pero sus voces quedan a menudo diluidas —o incluso silenciadas— porque parece más importante qué se ha conseguido que el quién, el cómo o el cuándo. En contadas ocasiones tenemos la posibilidad de disfrutar de un prólogo como el que abre *Editando genes*, escrito por Francis Mojica, el microbiólogo que, desde un laboratorio de la Universidad de Alicante, estudió durante años y casi sin reconocimiento ciertos microorganismos que viven en condiciones extremas en las salinas de la región. El mismo que descubrió que el sistema CRISPR proporcionaba inmunidad contra ácidos nucleicos invasores, y el mismo que, de hecho, acuñó el término CRISPR.

Más allá del prólogo, la obra está escrita por quien ha sido el pionero de la técnica CRISPR en España desde casi sus inicios en 2013. Lluís Montoliu, investigador del Centro Nacional de Biotecnología del CSIC, mantiene una página web donde incluye todos los artículos y avances que se están produciendo en este ámbito; una página que es un referente para todos los que usamos las herramientas CRISPR. Solo desde un conocimiento profundo pueden sintetizarse e integrarse las ideas para transmitirlas con rigor y precisión. Y tales características son muy pertinentes, pues en aras de la divulgación a veces se sacrifica el rigor científico, algo que no ocurre en este libro.

La obra cuenta con una cierta extensión. No obstante, ello no se debe a una falta de concisión, sino a la voluntad de transmitir de manera comprensible todo lo que actualmente se conoce sobre esta técnica. No es un libro para que lo hojeen curiosos sin interés. Se trata de una obra amena y de verbo fácil, pero con vocación de transmisión de conocimiento y con una exhaustiva revisión de datos. En la primera parte, el autor explica los principios básicos de las técnicas CRISPR con ejemplos claros y amenizando la exposición con elementos históricos y anécdotas personales. A lo largo de ella la complejidad va creciendo hasta que, en la segunda parte, nos vemos inmersos por completo en el mundo CRISPR, con todas sus aplicaciones actuales y posibilidades de desarrollo en el futuro inmediato.

El libro trata también el contexto histórico de esta área de investigación. Al menos en biomedicina y biotecnología, ningún gran avance se consigue desde la soledad. Se necesitan muchas manos, la mayoría poco conocidas, para construir el edificio de la ciencia. Esta visión coral —con la contribución particular de muchos científicos geniales, además del aporte seminal de Mojica y otros microbiólogos de todo el mundo— ofrece una riqueza de matices que puede perderse con facilidad en libros más concisos. *Editando genes* la presenta de forma hilada a medida que se van produciendo los distintos avances, en ocasiones incluso con cierto punto de intriga. Todo ello lo convierte en un libro apto para todos los públicos: desde el lector lego pero interesado hasta profesores, estudiantes y científicos que utilizan estas herramientas en su trabajo.

Los neófitos y estudiantes agradecerán la claridad en los conceptos. Los esquemas son sencillos (como dibujados en la pizarra), en escala de grises y sin florituras, pero con mensajes claros y precisos. Abundan las analogías y las comparaciones para ilustrar las ideas más complejas. Y también se comentan muchas de las cuestiones bioéticas que suscita el uso de las herramientas CRISPR, con argumentación y posicionamiento personal en algu-

nos temas considerados espinosos, como la clasificación por parte de la Comisión Europea de los organismos modificados mediante CRISPR como transgénicos, o la reciente edición génica de dos gemelas en China, cuando la técnica aún no está controlada. Quizás alguno de los últimos capítulos, en los que se explican las modificaciones del sistema CRISPR con verdaderas «piruetas» de ingeniería genética, puedan resultar un poco dificultosos para aquellos menos versados en biología molecular, pero serán apreciados por los especialistas.

Los docentes encontrarán numerosos ejemplos y pequeños detalles que podrán utilizar en clase para explicar e ilustrar las herramientas CRISPR. En la obra podemos apreciar un esfuerzo para transmitir mensajes claros en cada capítulo. Cierto es que hay algunas ideas, a modo de píldoras de conocimiento, que se repiten en distintas secciones. Con todo, creo que ello demuestra que el carácter del libro va más allá de la divulgación científica al uso y denota un componente pedagógico, con mensajes específicos e informativos.

Por último, los científicos hallarán una visión completa y detallada de las muchas posibilidades de las aplicaciones de CRISPR, con una extensísima bibliografía. Por otra parte, es un placer intelectual adentrarse en algunas de las novedosas aplicaciones presentadas al final de la obra.

Aunque la revolución CRISPR es reciente, su espectacular crecimiento había dejado un vacío que comenzaba a ser evidente. El libro de Montoliu llena ese hueco. La obra nace desde el conocimiento del significado biológico de estas herramientas. Explica su potencial, sus puntos fuertes y débiles, las aplicaciones que han surgido en los últimos seis años y abre la puerta al futuro. Como el mismo autor suele decir en sus conferencias, en el ámbito de la biología existen dos tipos de laboratorios: los que ya han usado las herramientas CRISPR y los que las usarán en el futuro. Y todos, incluso aquellos que no son científicos, necesitan saber qué son, qué nos ofrecen y cómo van a cambiar nuestro porvenir.

—Gemma Marfany
Departamento de Genética
Universidad de Barcelona

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



ORÍGENES
CÓMO LA HISTORIA DE LA TIERRA DETERMINA LA HISTORIA DE LA HUMANIDAD
Lewis Dartnell
Debate, 2019
ISBN: 9788499929637
400 págs. (22,90 €)



EN LLAMAS
CÓMO LA COCINA NOS HIZO HUMANOS
Richard Wrangham
Prólogo de José Miguel Mulet
Capitán Swing, 2019
ISBN: 978-84-949668-7-3
264 págs. (18,50 €)

APOLO 11
LA APASIONANTE HISTORIA DE CÓMO EL HOMBRE PISÓ LA LUNA POR PRIMERA VEZ
Eduardo García Llama
Editorial Crítica, 2019
ISBN: 978-84-9199-128-1
400 págs. (19,90 €)

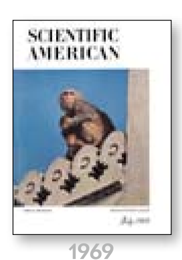


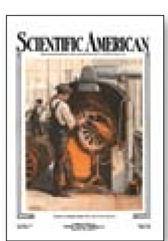
EL GRAN SALTO AL ABISMO
LA EXTRAORDINARIA HISTORIA DE UN TÉCNICO ESPAÑOL DE LA NASA EN LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO
Jesús Sáez Carreras
Prólogo de Michael López-Alegría
Epílogo de Charles M. Duke, Jr.
Next Door Publishers, 2019
ISBN: 978-84-949245-6-9
244 págs. (19,95 €)

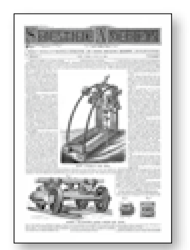


Recopilación de Daniel C. Schlenoff

JULIO


1969


1919


1869

1969

El rompecabezas del neutrino

«La mayoría de los físicos y los astrónomos comparten la creencia de que el calor del Sol es generado por reacciones nucleares de fusión que crean elementos más pesados a partir de elementos ligeros. Comprobar la veracidad de esta hipótesis, empero, sigue sin ser fácil, a los casi 50 años de ser propuesta por sir Arthur Eddington. De las partículas liberadas por esas hipotéticas reacciones en el interior del astro, solo una especie posee la capacidad de abrirse paso hasta la superficie (una distancia de unos 650.000 kilómetros) y escapar al espacio: el neutrino. El año pasado empezó a funcionar una gigantesca trampa para neutrinos instalada en una cavidad rocosa en lo más profundo de la mina Homestake de Lead, en Dakota del Sur. Los primeros resultados publicados han dejado algo desconcertados a astrónomos y astrofísicos porque el flujo de neutrinos parece bajo.

—John N. Bahcall»

1919

Glorias de la aviación

«El triplano Tarrant marca un hito más en el crecimiento de la aviación, el futuro de la cual escapa a la visión del profeta más dotado. El aparato posee una superficie alar total de 465 metros cuadrados y un peso a plena carga nominal superior a las 20 toneladas. Destaca en especial no solo porque sea el avión más grande del mundo, sino también por los métodos de construcción enteramente nuevos que incorpora. Por desgracia, el primer avión Tarrant, conocido como el "Tabor", estaba destinado a durar poco, pese a los meses y meses de trabajo concienzudo invertidos en su construcción. A los pocos minutos de despegar de Farnborough, en Inglaterra, la estructura se deshizo por completo.»

Semillas de guerra

«La firma por Alemania del Tratado de Paz de Versalles pone fin a la guerra de las armas iniciada por los alemanes en los campos de Bélgica. Si los países vencidos que firmaron y sellaron el compromiso de paz lo hicieron desde un odio ciego, irracional e implacable en el corazón, será una mera cuestión de tiempo y oportunidad el que los Ejércitos se pongan en marcha y el mundo vuelva a teñirse de rojo. Es nuestra firme creencia, pues no hay evidencias en contra, de que a los países de la Entente, en estos momentos de culminación de su éxito, les preocupa más la sanación del mundo que la humillación de los vencidos.»

En aquel momento, el economista John Maynard Keynes predijo, correctamente, que las duras medidas punitivas incluidas en el tratado paralizarían la economía alemana.

Un cuento de monos

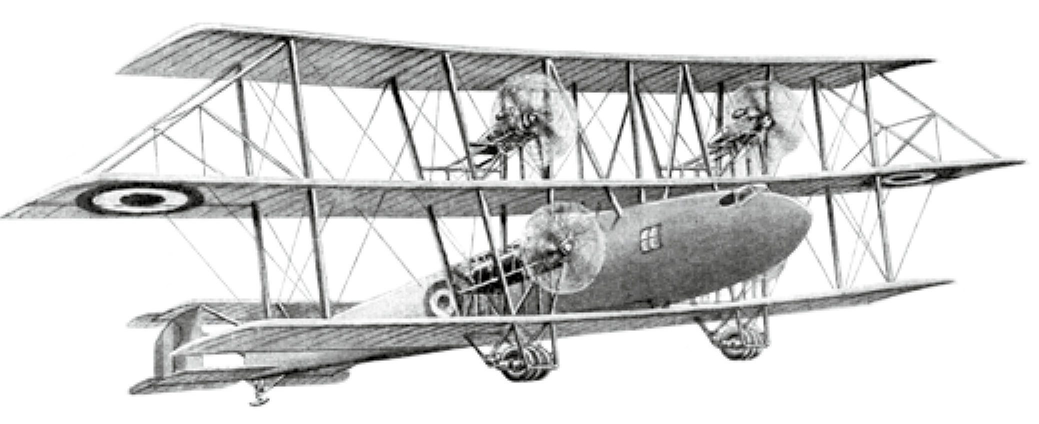
«Un interesante artículo del profesor E. W. Grudger, en un número reciente de *Natural History*, trata del tradicional tópico, bajo el que nos educaron a casi todos, de que los monos sudamericanos acostumbran a cruzar los riachuelos y arroyos infestados de caimanes trabando sus rabos y piernas para formar un puente viviente. Hasta donde se sabe, el primero en narrar el hecho fue el padre José Acosta, jesuita, en un texto publicado en 1589. El primero en discutir su veracidad fue el barón Humboldt. Últimamente, los señores Leo E. Miller y George K. Cherie, del Museo Americano de Historia Natural, que han viajado mucho por Sudamérica para reunir material, han sugerido un origen plausible para esas fábulas. Creen que el relato sobre los "puentes de monos" es producto de la observación de una procesión de monos cruzando un barranco o una corriente a lo largo de una liana colgante.»

1869

Riesgos laborales

«En el *British Medical Journal* se lee: "Debido a la imposibilidad de impedir que la pintura entre en contacto con la piel mientras trabajan; a la práctica casi general entre ellos de tocar la comida sin lavarse las manos; y a la costumbre de algunos de ellos de vestir de pana, fustán y otros tejidos de difícil lavado, los pintores absorben grandes cantidades del dañino metal plomo, lo que les acarrea graves consecuencias. Si uno sigue en el oficio, es casi seguro que será atacado por las más peligrosas dolencias, como parálisis o nefropatía, hasta dejarlo, si no del todo inútil para trabajar, tan débil y postrado que, tanto por su capacidad mental como física, no será sino una sombra de la persona que fue. En la fabricación de pinturas se han usado distintas sustancias en lugar del plomo, y con un éxito alentador. Del empleo del zinc nos han llegado informes favorables."»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXXI, N.º 1, 5 DE JULIO DE 1919


1919: El Tarrant Tabor fue durante un tiempo muy breve, brevísimo, el avión más grande del mundo.



NEUROCIENCIA

La dieta del bisturí

Bret Stetka

La cirugía para adelgazar podría modificar las conexiones entre el cerebro y los intestinos.

EVOLUCIÓN

El auge de los animales

Rachel A. Wood

Los últimos fósiles hallados y los análisis más recientes de la química de los antiguos océanos resaltan la importancia de la explosión cámbrica.



FÍSICA

Flujos de calor que soslayan la ley de Fourier

Olivier Bourgeois, Dimitri Tainoff, Natalio Mingo, Bjorn Vermeersch y Jean-Louis Barrat

La ley que formuló Joseph Fourier hace más de doscientos años no es aplicable al nanomundo. ¿Qué rige el transporte del calor a escala microscópica?



MEDIOAMBIENTE

Contaminación atmosférica y salud pública

Mark J. Nieuwenhuijsen

¿Cuándo tienen los contaminantes del aire un efecto perjudicial notable? ¿Cómo pueden conocerse los daños que ocasionan en el organismo?

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE
Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Javier Grande: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes y La temible y electrizante anguila*; José Óscar Hernández Sendín: *Un pequeño paso atras en el tiempo, La herencia del Apolo, El origen de la Luna, Pugna por la Luna y Todo el mundo es bienvenido*; Ana Mozo: *Alzhéimer: diferencias entre sexos*; Fabio Teixidó: *Ciudades esponja*; Elisa Vilaret: *El caos del dengue*; Claudi Mans: *El arte de coleccionar elementos químicos*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España